

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

РОМАЩЕНКО ОЛЕНА ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 533.9

**ДИНАМІКА ТА ФАЗОВІ СТАНИ МАКРОЧАСТИНОК
В ПУЧКОВО-ПЛАЗМОВИХ СИСТЕМАХ**

01.04.08 – фізика плазми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна
Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор,
член-кореспондент НАН України,
Гірка Ігор Олександрович, Харківський національний
університет імені В. Н. Каразіна, навчально-науковий
інститут «Фізико-технічний факультет», директор ННІ
«Фізико-технічний факультет».

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, старший науковий
співробітник, **Засенко Володимир Іванович**,
Інститут теоретичної фізики імені М. М. Боголюбова
НАН України, заступник директора з наукової роботи;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий
співробітник, **Літовко Ірина Валентинівна**,
Інститут ядерних досліджень НАН України, старший
науковий співробітник відділу фізики плазми та
плазмових технологій;

доктор фізико-математичних наук, професор,
Маслов Василь Іванович, Інститут плазмової
електроніки та нових методів прискорення, Національний
науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»
НАН України, провідний науковий співробітник.

Захист дисертації відбудеться ”13” травня 2021 р. о 14-00 годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 Харківського національного університету імені
В. Н. Каразіна за адресою: 61108, м. Харків, пр. Академіка Курчатова, 31, ауд. 313.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського
національного університету імені В. Н. Каразіна МОН України за адресою: 61022,
м. Харків, майдан Свободи 4.

Автореферат розісланий “12” квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої
ради Д 64.051.12



Андрій ГАХ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Плазмові технології з використанням пучків іонів та електронів інтенсивно розробляють і впроваджують протягом багатьох років. Пучково-плазмові системи широко використовують для модифікації властивостей матеріалів і плазмової обробки поверхонь. Зокрема, бомбардуванням поверхні мішені пучками заряджених частинок змінюють оптичні, електричні та механічні властивості поверхні. Для йонно-плазмової обробки поверхонь використовують іонні потоки, які генеруються вакуумно-дуговими йонними джерелами.

Наявність макрочастинок (МЧ) у пучково-плазмових системах є істотною перешкодою для багатьох технологічних застосувань, зокрема, для застосувань, пов'язаних із вакуумною дугою. Генерація металеві плазми у вакуумно-дуговому розряді завжди супроводжується утворенням МЧ. Унаслідок ерозії катоду разом із плазмовим потоком емітує значне число МЧ. Крапельна фаза ерозії катоду визначається теплофізичними властивостями матеріалу катоду, струмом і тривалістю вакуумної дуги. Для легкоплавких матеріалів катоду, таких як купрум, алюміній, срібло, оливо, обсяг МЧ за деяких умов може сягати 60÷90 % від загального перенесення маси. МЧ являють собою краплини розплавленого матеріалу катоду, за винятком тугоплавких матеріалів катоду. В останньому випадку МЧ – це тверді уламки катодного матеріалу. МЧ мають типові розміри від 0.1 мкм до 100 мкм та швидкості від 1 м/с до 800 м/с. Рухаючись у напрямку підкладки, МЧ взаємодіють із плазмою, внаслідок чого МЧ можуть або охолоджуватися, або нагріватися та випаровуватися. Залежно від фазового стану відбувається або прилипання МЧ до поверхонь, або відбиття їх від підкладки, або занурення у приповерхневий шар підкладки. Виникають неоднорідності поверхні різних типів, що впливає на якість осаджених плівок та поверхонь. При цьому погіршуються такі характеристики поверхонь як адгезія, шорсткість, корозійні та інші властивості. Втім, наявність МЧ у технологічній плазмі не завжди є критичним фактором. Наприклад, при нанесенні TiN, як декоративного або зносостійкого покриття на різці інструментів, наявністю МЧ можна знехтувати. Проте, у таких галузях, як оптика та мікроелектроніка, наявність МЧ має принциповий характер та є суттєвою перешкодою для виробництва якісних плівок. Так, в оптиці МЧ відіграють роль центрів розсіювання, вони збільшують оптичні втрати та зменшують контраст. Покриття пристроїв мікроелектроніки є особливо уразливими до наявності МЧ, оскільки товщина осаджених плівок становить 0.01÷1 мкм, що є порядку розмірів МЧ.

Чимало зусиль докладено, щоб отримати чисті плівки та покриття без ушкоджень МЧ. Основним методом видалення МЧ з потоку вакуумно-дугової плазми є використання магнітних фільтрів різноманітної конфігурації. Проте, застосування магнітних фільтрів призводить до суттєвого зниження продуктивності технологічного процесу, тому в останні роки паралельно до новітніх систем фільтрації інтенсивно розробляють і нефільтрові методи очищення плазми. Наприклад, додавання

електронного пучка до плазмової системи дає можливість випаровувати та руйнувати МЧ. Результати експериментальних досліджень упродовж останніх років указують на те, що зменшити та запобігти забрудненню поверхонь та покриттів МЧ можливо й шляхом коригування параметрів технологічних процесів, таких як реакційний газ, магнітне поле, струм, потенціал зсуву підкладки, тощо. Нефільтрові методи не забезпечують повного очищення плазми, проте є простішими та мають нижчу вартість.

Тема дисертації є актуальною, тому що існує нагальна потреба в розв'язуванні задач, як фундаментального, так і прикладного характеру, що стосуються МЧ у пучково-плазмових системах. Сукупність результатів експериментальних досліджень потребує детального теоретичного обґрунтування. До фундаментальних задач, які розглянуті у дисертаційній роботі, належать теорія заряджання МЧ у плазмі з електронним (іонним) пучком, а також теорія енергетичного обміну між МЧ та плазмою з пучком електронів (іонів), що визначають динаміку та фазові стани МЧ у пучково-плазмових системах. Задачі прикладного характеру пов'язані з удосконаленням магнітних фільтрів для видалення МЧ та розвитком альтернативних ефективних методів очищення плазми від МЧ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в Навчально-науковому інституті «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна відповідно до тематичних планів фундаментальних науково-дослідних робіт. Результати досліджень дисертаційної роботи були здобуті в межах виконання науково-дослідної роботи з таких держбюджетних тем: «Взаємодія плазми та випромінювання із макро- та мікроповерхнями», № ДР 0112U005919 (2012–2015 рр.); «Комплексні дослідження процесів взаємодії потоків заряджених частинок із речовиною», № ДР 0117U004869 (2017–2019 рр.); «Оптимізація формування і контролю потоків електронів і гальмівного випромінювання в радіаційних технологіях», № ДР 0120U102300 (2020 р.); «Вплив внутрішніх ступенів вільності частинок на фізичні характеристики квантових систем поблизу фазових переходів», № ДР 0120U102252 (2020 рр.).

Мета і завдання дослідження. Основною метою дисертаційної роботи є вивчення впливу пучків електронів та йонів на динаміку та фазові стани МЧ у низькотемпературній плазмі; виявлення чинників, що зумовлюють зменшення вмісту МЧ у плазмовому потоці вакуумної дуги, а також на осаджених покриттях.

Для досягнення цієї мети потрібно було вирішити такі **завдання**:

1. Виявити загальні закономірності заряджання МЧ у плазмі у присутності пучків електронів (іонів). Визначити вплив емісійних процесів на заряджання МЧ. Побудувати теоретичні моделі заряджання МЧ у плазмі у присутності пучків електронів (іонів) з урахуванням емісійних процесів у розрядному проміжку, а також у плазмовому шарі поблизу підкладки.
2. Виявити загальні закономірності енергетичного обміну МЧ з плазмою та з пучками заряджених частинок. Визначити вплив емісійних процесів на температуру МЧ. Побудувати теоретичну модель енергетичного обміну МЧ з плазмою та з пучками заряджених частинок з урахуванням емісійних процесів.

3. Дослідити фазові стани МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду для імпульсного та стаціонарного режимів роботи.
4. Дослідити динаміку та фазові стани МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду за умов, що відповідають різним технологічним процесам: вакуумно-дуговому осадженню тонких плівок та плазмовій імерсійній іонній імплантації іонів; вакуумно-дуговому осадженню у присутності реакційного газу.
5. Дослідити вплив параметрів технологічних процесів, таких як енергія пучків, тиск реакційного газу нітрогену, потенціал зсуву на підкладці та інших, на динаміку та фазові стани МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду.
6. Запропонувати теоретичні моделі, які дають можливість пояснити фізичні явища, що спостерігаються в експериментах. Порівняти результати числового моделювання з результатами експериментів.

Об'єкт дослідження: макрочастинки (МЧ) в пучково-плазмових системах.

Предмет дослідження: динаміка та фазові стани макрочастинок у плазмових системах з пучками електронів (іонів).

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано аналітичні та числові методи теорії фізики плазми. Зарядження МЧ досліджено у межах теорій, що походять від теорії електростатичних зондів: теорії обмеженого орбітального руху; повної теорії орбітального руху, яка враховує скінченність шару просторового заряду навколо МЧ, та бомової теорії, яка враховує напрямлені швидкості йонів на межі шару навколо МЧ. Флуктуації заряду описані на підставі дискретної моделі. Функцію розподілу МЧ за зарядами визначено з рівняння Фоккера-Планка. Динаміку МЧ у плазмі вакуумної дуги у присутності реакційного газу досліджено в межах комбінованої теоретичної моделі, яку побудовано на базі плазмової хімії, одновимірної багато-рідинної гідродинаміки та теорії обмеженого орбітального руху.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що **вперше:**

1. Досліджено динаміку та фазові стани МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду за умов, що відповідають різним технологічним процесам: вакуумно-дуговому осадженню тонких плівок та плазмовій імерсійній іонній імплантації; вакуумно-дуговому осадженню у присутності реакційного газу.
2. Вивчено вплив параметрів технологічних процесів, таких як енергія та концентрація пучків, тиск газу нітрогену, потенціал зсуву на підкладці на динаміку та фазові стани МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду.
3. Визначено вплив багатозарядних іонів на динаміку та фазові стани МЧ у плазмі вакуумно-дуговому розряду.
4. Запропоновано пояснення зменшення числа МЧ на поверхнях покриттів при докладанні до підкладки постійного та імпульсного негативних потенціалів зсуву. Для цього побудовано внутрішньо самоузгоджену комбіновану теоретичну модель, складниками якої є модель плазмового шару та модель зарядження МЧ на основі теорії обмеженого орбітального руху. У випадку постійного потенціалу зсуву

підкладки використано стаціонарну модель плазмового шару, а у випадку імпульсного потенціалу зсуву – змінну з часом модель.

5. Запропоновано пояснення зменшення числа МЧ у вакуумно-дуговому розряді у присутності реакційного газу нітрогену, який впливає на заряджання та динаміку МЧ у плазмі, а також на зменшення її температури. Для цього побудовано внутрішньо самоузгоджену комбіновану теоретичну модель, складниками якої є плазмово-хімічна модель, гідродинамічна модель розрядного проміжку та модель заряджання на основі теорії обмеженого орбітального руху.
6. Визначено роль вторинної йон-електронної емісії з підкладки у заряджанні та динаміці МЧ у приповерхневому плазмовому шарі. Показано, що коефіцієнт вторинної електронної емісії відіграє вирішальну роль у електростатичному відбитті МЧ від підкладки.
7. Теоретично обґрунтовано можливість руйнування МЧ електронним пучком. Проаналізовано умови, за яких відбувається руйнування МЧ електронним пучком. Здобуто критерій електростатичного руйнування МЧ, що враховує енергію електронного пучка.
8. Досліджено флуктуації заряду МЧ у плазмі з електронним пучком. Здобуто час релаксації заряду МЧ до рівноважного значення залежно від енергії електронного пучка.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Запропоновані у дисертаційній роботі теоретичні моделі дають можливість пояснити фізичні явища, що спостерігають в експериментах:
 - 1) зменшення числа та розмірів МЧ у плазмі при інжекції електронного пучка у вакуумно-дугові технологічні системи нанесення покриттів;
 - 2) зменшення вмісту МЧ на покриттях при підвищенні потенціалу зсуву підкладки у вакуумно-дуговому розряді;
 - 3) зменшення вмісту МЧ на покриттях при докладанні імпульсного потенціалу зсуву до підкладки у вакуумно-дуговому розряді;
 - 4) відсутність МЧ на осаджених покриттях при потужнострумовому імпульсному дуговому режимі роботи планарної магнетронної розпилювальної системи;
 - 5) зменшення вмісту МЧ на покриттях при підвищенні тиску реакційного газу у вакуумно-дуговому розряді.
2. Здобуті результати можна використовувати для контролю МЧ у плазмових технологіях, таких як вакуумно-дугове осадження тонких плівок і плазмова імерсійна іонна імплантація.
3. Здобуті результати сприятимуть удосконаленню магнітних фільтрів для видалення МЧ з плазмового потоку.
4. Здобуті результати можуть бути використані для розвитку альтернативних методів очищення плазми від МЧ без застосування магнітних фільтрів; розробки систем фільтрації, що не передбачають видалення крапельної фази з плазмового потоку.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові узагальнення, положення, результати та висновки, викладені у дисертації, виконані дисертанткою особисто. Дисертантка безпосередньо брала участь у постановці проблеми, розробці теоретичних моделей, що описують фізичні процеси макрочастинок у плазмових системах за наявності пучків електронів (іонів), у проведенні числового моделювання на підставі запропонованої моделі, у написанні та підготовці наукових статей [1–22] та тез доповідей на міжнародних наукових конференціях [23–27].

У роботі [1] дисертантка здобула критичні розміри МЧ з різних речовин, що визначають динаміку температури, залежно від плазмових параметрів; побудувала діаграму груп МЧ за критичними розмірами. У роботі [2] дисертантка брала участь у дослідженні режимів роботи планарної магнетронної розпилювальної системи; запропонувала модель, яка пояснює відсутність МЧ на осаджених поверхнях покриттів у потужнострумівому імпульсному дуговому режимі роботи планарної магнетронної розпилювальної системи. У роботі [3] дисертантка побудувала теоретичну модель заряджання МЧ у плазмі пучково-плазмових систем з урахуванням автоелектронної емісії, а також з урахуванням обмеження емісійного струму власним просторовим зарядом. У роботі [4] дисертантка побудувала теоретичну модель енергетичного обміну між МЧ та плазмою вакуумної дуги, до якої додають електронний пучок; здобула залежність температури МЧ від часу в плазмі вакуумно-дугового розряду за наявності електронного пучка. У роботі [5] дисертантка розраховувала потенціал МЧ у вакуумно-дуговій системі залежно від енергії вторинних електронів. У роботі [6] дисертантка брала участь у дослідженні режимів роботи планарної магнетронної розпилювальної системи; виконала розрахунки динаміки розподілу температури у приповерхневому шарі матеріалу мішені магнетронної розпилювальної системи при підведенні тепла до поверхні за умови низького тиску робочого газу. У роботі [7] дисертантка удосконалила теоретичну модель енергетичного обміну між МЧ та плазмою вакуумної дуги, до якої додають електронний пучок, урахувавши обмеження емісійного струму власним просторовим зарядом. У роботах [8, 23] дисертантка побудувала теоретичну модель зарядового обміну МЧ з плазмою та електронним пучком на основі дискретної теорії та класичної теорії обмеженого орбітального руху; здобула аналітичний вираз для функції розподілу МЧ за зарядами. У роботах [9, 24] дисертантка розраховувала потенціал МЧ у плазмі вакуумно-дуговому розряду з урахуванням іон-електронної емісії та термоелектронної емісії; визначила вплив зарядового стану йонів на потенціал і температуру МЧ. У роботі [10] дисертантка здобула критичний радіус МЧ, яка може бути захопленою у криволінійному плазмоводі. У роботі [11] дисертантка розраховувала потенціал МЧ у приповерхневому плазмовому шарі як функцію локального положення МЧ у плазмовому шарі з урахуванням потенціальної електронної емісії з підкладки, що викликана бомбардуванням багатозарядними йонами. У роботі [12] дисертантка удосконалила модель динаміки МЧ у магнітному фільтрі вакуумно-дугових джерел плазми; провела аналіз умов, за яких можливе транспортування МЧ крізь фільтр. У роботах [13, 27] дисертантка розраховувала заряд МЧ у плазмовому шарі при плазмовій імерсійній іонній

імплантації з урахуванням кінетичної електронної емісії з підкладки, яка викликана бомбардуванням багатозарядними йонами. У роботі [14] дисертантка розв'язала рівняння балансів енергії та маси МЧ в іонно-плазмовій системі. У роботі [15] дисертантка визначила швидкості МЧ, які можуть бути повністю або частково випарені при їхньому проходженні крізь плазму з гарячими електронами. У роботі [16] дисертантка побудувала теоретичну модель електростатичного руйнування МЧ електронним пучком; провела аналіз умов, за яких відбувається руйнування МЧ електронним пучком. У роботі [17] дисертантка розрахувала заряд МЧ у приповерхневому плазмовому шарі з урахуванням залежності зарядового складу йонів, потоків та енергій іонів від тиску реакційного газу. У роботах [18, 26] дисертантка дослідила вплив зіткнень іонів з нейтралами на динаміку МЧ; здобула залежності сили тертя з боку нейтралів та сили тертя з боку йонів від частоти зіткнень. У роботі [19] дисертантка побудувала теоретичну модель взаємодії МЧ з плазмою поблизу підкладки, до якої застосовано імпульсний потенціал зсуву. У роботі [20] дисертантка поширила теорію обмеженого орбітального руху на випадок заряджання МЧ з урахуванням електрон-електронної емісії; здобула критичні розміри МЧ, які підлягають руйнуванню електронним пучком. У роботі [21] дисертантка побудувала теоретичну модель, що дає можливість дослідити динаміку МЧ у плазмовому шарі вакуумно-дугового розряду; якісно та кількісно описала фізичний механізм електростатичного відбиття МЧ від підкладки та здобула критерій відбиття МЧ від підкладки. У роботі [22] дисертантка побудувала теоретичну модель, яка дає можливість дослідити динаміку МЧ у плазмовому потоці, що формується у розрядному проміжку вакуумно-дугового розряду у присутності реакційного газу. У роботі [25] дисертантка визначила критичні швидкості МЧ, які здатні електростатично відбитися від підкладки.

Апробація результатів дослідження. Основні результати дисертаційної роботи представлені та доповідалися на таких міжнародних конференціях:

International Conference School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop “Nano- and micro-sized structures in plasmas”, Alushta (Crimea), Kharkiv, Ukraine, 2012, 2014; International Conference School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Kharkiv, Ukraine, 2016, 2018; Deutsche Physikalische Gesellschaft-Fruhjahrstagung Spring Meeting of the Matter and Cosmos Section, Bremen, Germany, March 13–17, 2017; XIV International Conference “Plasma Electronics and New Methods of Acceleration”, Kharkiv, Ukraine, 2018.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 27 наукових працях, серед яких 14 статей [6–19] у виданнях України, що індексуються в міжнародних наукометричних базах; 3 статті [20–22] в зарубіжних наукових спеціалізованих виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах; 5 публікацій [1–5] у фахових виданнях України, що додатково відображають наукові результати дисертації, та 5 тез доповідей на міжнародних фахових наукових конференціях [23–27].

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 323 сторінки, з них 265 сторінок основного тексту. Дисертаційна робота містить 80 рисунків та 4 таблиці. Список використаних джерел містить 278 найменувань на 28 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету та основні задачі дослідження, розкрито наукову новизну, теоретичне та практичне значення здобутих результатів, наведено зв'язок досліджень за темою дисертації з науковими програмами, підкреслено особистий внесок автора в дисертаційну роботу, підтверджено апробацію матеріалів дисертації, результати якої були представлені на міжнародних конференціях з фізики плазми.

У **першому розділі** на основі літературних джерел проаналізовано особливості емісії МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду. Проведено огляд основних теорій емісії МЧ, які ґрунтуються на принципі формування ерозійних кратерів на поверхні катоду. Наведено дані експериментальних робіт щодо функцій розподілу МЧ за розмірами, кутами та швидкостями.

Розглянуто особливості заряджання МЧ у плазмі. Проведено огляд основних моделей заряджання МЧ на підставі теорії електростатичних зондів. Проаналізовано межі застосування таких теорій заряджання, як теорія обмеженого орбітального руху (ООР), повна теорія радіального руху, бомова теорія, модифіковані теорії ООР. Проведено співставлення значень плаваючого потенціалу МЧ, розрахованого за цими теоріями. Особливу увагу приділено вторинній електронній емісії, яка може суттєво впливати на заряд МЧ. Розглянуто питання про динаміку МЧ у плазмі, а також взаємодію МЧ з плазмою.

Проаналізовано методи видалення МЧ з плазмового потоку за допомогою різних магнітних фільтрів. Обговорено альтернативні засоби зменшення забруднень МЧ покриттів без застосування магнітних фільтрів.

У **другому розділі дисертації** розглянуто фізичні механізми заряджання МЧ у плазмових системах у присутності низькоенергетичного пучка електронів з енергією до 10 кеВ та густиною струму до декількох кА/см². Досліджено процеси обміну енергією між МЧ та електронно-пучковою плазмою. Розглянуто можливість випаровування та руйнування МЧ електронним пучком.

У підрозділі 2.1 досліджено заряджання ізолюваної МЧ у плазмових системах з електронним пучком з урахуванням вторинної електрон-електронної емісії у межах теорії ООР. Умовою застосування теорії ООР є така подвійна сильна нерівність

$$a \ll \lambda_D \ll \lambda_{e,(i)}, \quad (1)$$

тобто, радіус Дебая λ_D є набагато більшим за радіус МЧ a , але набагато меншим за довжину вільного пробігу електронів (іонів) $\lambda_{e,i}$. МЧ є ізолюваною, тобто, інші

макрочастинки не впливають на рух електронів та йонів поблизу МЧ. Це можливо, якщо відстань між МЧ $d \cong n_{МЧ}^{-1/3}$, де $n_{МЧ}$ – концентрація макрочастинок, є набагато більшою за довжину екранування λ_D , $n_{МЧ} \lambda_D^3 \ll 1$.

Розглянуто ефективну електронну емісію внаслідок бомбардування МЧ зарядженими частинками: електронами та йонами плазми, електронами пучка. Показано, що вторинною електронною емісією, викликаною бомбардуванням поверхні МЧ плазовими частинками: електронами та йонами, – можна знехтувати порівняно з вторинною електронною емісією, що викликана бомбардуванням пучком моноенергетичних електронів.

Аналіз заряджання МЧ проведено на підставі розв’язання рівняння балансу струмів для плаваючого потенціалу $\phi_{Пл}$:

$$I_i(\phi_{Пл}) + I_e(\phi_{Пл}) + I_b(\phi_{Пл})(1 - \delta) = 0, \quad (2)$$

де $I_e(\phi_{Пл})$, $I_i(\phi_{Пл})$, $I_b(\phi_{Пл})$ – це струми електронів плазми, йонів плазми, та електронного пучка, відповідно. Коефіцієнт вторинної електрон-електронної емісії δ визначається універсальною кривою Стернгласса:

$$\delta = 7.4 \delta_m \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_m} \exp\left(-2 \sqrt{\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_m}}\right), \quad (3)$$

де δ_m – максимальне значення δ ; ε_e – енергія моноенергетичного пучка первинних електронів; ε_m – енергія первинного пучка електронів, для якого $\delta = \delta_m$. У межах ємнісної моделі заряд МЧ визначено через потенціал МЧ $\phi_{Пл}$ так:

$$Q = 4\pi\varepsilon_0 a(1 + a/\lambda_D)\phi_{Пл}. \quad (4)$$

де a – це радіус МЧ, λ_D – довжина екранування.

Розраховано плаваючий потенціал $\phi_{Пл}$ та відповідний заряд Q МЧ у низькотемпературній газорозрядній плазмі низького тиску у присутності електронного пучка для двох типів матеріалів МЧ: з високим ($\delta_m > 1$) та низьким ($\delta_m < 1$) максимальними коефіцієнтами електронної емісії.

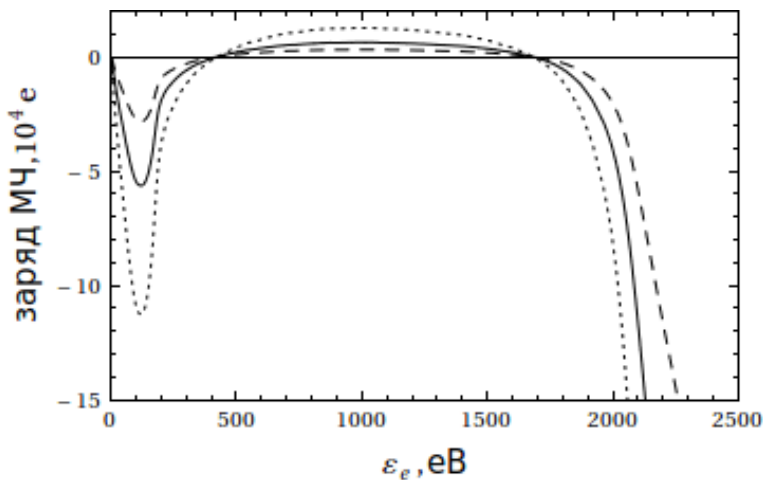


Рис. 1 Залежність заряду вольфрамової МЧ від енергії ε_e електронного пучка, радіус якої становить 0.5 мкм (штрихова лінія), 1 мкм (суцільна лінія), 2 мкм (точкова лінія). Концентрація електронного пучка $n_b = 10^{15} \text{ м}^{-3}$, концентрація електронного пучка $n_b = 10^{15} \text{ м}^{-3}$

Проведено співставлення здобутих залежностей плаваючого потенціалу $\phi_{пл}$ та заряду МЧ від енергії електронного пучка для двох випадків. Установлено, що бомбардування вольфрамових МЧ ($\delta_m > 1$) мікронних розмірів у плазмі з концентрацією $n_0 = 10^{15} \text{ м}^{-3}$ електронним пучком з концентрацією $n_b = 10^{15} \text{ м}^{-3}$ призводить до надвисокого заряджання (до величини заряду $10^5 e$). Проте, МЧ з радіусом 2 мкм та вище мають високий негативний заряд порядку $10^5 e$ у двох інтервалах енергій електронного пучка: в інтервалі низьких енергій електронного пучка: $100 \text{ eV} < \varepsilon_e < 250 \text{ eV}$, та за енергії електронного пучка понад 2 кеВ, а МЧ з меншими радіусами набувають такого самого заряду лише за енергії електронного пучка понад 2 кеВ (Рис. 1).

У підрозділі 2.2 досліджено заряджання МЧ у плазмових системах з електронним пучком у класичному наближенні обмеженого орбітального руху та на підставі дискретної моделі. Досліджено флуктуації заряду МЧ у плазмових системах у присутності електронного пучка, що пов'язані з випадковістю процесу заряджання. Заряджання МЧ розглянуто як одно-кроковий марків процес. Проведено аналогію між заряджанням МЧ у плазмі та рухом броунової частинки. Здобуто аналітичний вираз для функції розподілу МЧ за зарядами f_z у плазмі з електронним пучком з урахуванням вторинної електрон-електронної емісії внаслідок розв'язання рівняння Фоккера-Планка

$$\frac{\partial f_z}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} [A(z)f_z(z,t)] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} [B(z)f_z(z,t)] \quad (5)$$

з коефіцієнтами

$$A(z) = \left. \frac{\Delta z}{\Delta t} \right|_{\Delta t \rightarrow 0}, \quad B(z) = \left. \frac{\Delta z^2}{\Delta t} \right|_{\Delta t \rightarrow 0}. \quad (6)$$

Функцію розподілу МЧ з радіусом 1 мкм за зарядами знайдено за типових умов лабораторної плазми: плазма гідрогену з концентрацією $n_0 = 10^{15} \div 10^{16} \text{ м}^{-3}$, температура електронів плазми $T_e = 10 \text{ eV}$, температура йонів $T_i = 1 \text{ eV}$; концентрація електронного пучка $n_b = 10^{15} \text{ м}^{-3}$; енергія електронного пучка $\varepsilon_e = 25 \div 100 \text{ eV}$. Показано, що функція розподілу МЧ за зарядами залежить від концентрацій плазми та електронного пучка. Електронний пучок з концентрацією $n_0 = 10^{15} \text{ м}^{-3}$ суттєво не впливає на функцію розподілу для МЧ, що містяться у плазмі з концентрацією $n_0 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$. Зміни функції розподілу виявлені для МЧ, що містяться у плазмі з концентрацією $n_0 = 10^{15} \text{ м}^{-3}$. Досліджено еволюцію заряду з часом. Установлено, що за наявності електронного пучка МЧ швидше заряджається до рівноважного заряду, а значення рівноважного заряду збігаються з максимумами функцій розподілу.

У підрозділі 2.3 досліджено вплив різних процесів електронної емісії на заряджання макрочастинки у плазмі у присутності електронного пучка. Для опису заряджання МЧ у плазмових системах з електронним пучком теоретичну модель

модифіковано в такий спосіб, щоби врахувати можливі процеси електронної емісії з поверхні МЧ, такі як вторинна електрон-електронна емісія, термоелектронна, автоелектронна, та термо-автоелектронна емісії.

Аналіз заряджання МЧ проведено на підставі розв'язання рівняння балансу струмів для плаваючого потенціалу $\varphi_{\Pi\lambda}$:

$$I_i(\varphi_{\Pi\lambda}) + I_e(\varphi_{\Pi\lambda}) + I_b(\varphi_{\Pi\lambda}) + I_{e-e}(\varphi_{\Pi\lambda}) + I_{e,TE}(\varphi_{\Pi\lambda}) = 0, \quad (7)$$

де $I_e(\varphi_{\Pi\lambda})$, $I_i(\varphi_{\Pi\lambda})$, $I_b(\varphi_{\Pi\lambda})$ та $I_{e-e}(\varphi_{\Pi\lambda})$ – це струми електронів плазми, іонів плазми, електронного пучка та вторинних електронів, відповідно. У відповідності до поставленої задачі $I_{TE}(\varphi_{\Pi\lambda})$ – це струм або термоелектронної, або автоелектронної, або термо-автоелектронної емісії з поверхні МЧ.

Розраховано критичні температури МЧ з різних речовин, за яких слід враховувати термоелектронну емісію. Розрахунки показують, що критична температура МЧ є більшою за температури електронів $T_e = 10$ еВ, ніж за $T_e = 1$ еВ. Так само критична температура МЧ є більшою за концентрації плазми $n_0 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, ніж за $n_0 = 10^{15} \text{ м}^{-3}$.

Розраховано критичні температури МЧ з різних речовин, за яких слід враховувати термоелектронну емісію. Критичну температуру для МЧ здобуто з умови балансу електронного та термоелектронного струмів

$$I_e = I_{e,T}. \quad (8)$$

Розрахунки показують, що критична температура МЧ є більшою за температури електронів $T_e = 10$ еВ, ніж за $T_e = 1$ еВ. Так само критична температура МЧ є більшою за концентрації плазми $n_0 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, ніж за $n_0 = 10^{15} \text{ м}^{-3}$.

Розраховано максимальний потенціал МЧ, до якого може розрядитися МЧ внаслідок автоелектронної емісії при обмеженні емісійного струму власним просторовим зарядом, залежно від радіусу МЧ.

Розраховано плаваючий потенціал МЧ у плазмі з електронним пучком для двох граничних випадків, які спостерігаються у різних діапазонах енергії електронного пучка: для МЧ з високою температурою та відносно малою напруженістю електричного поля на її поверхні та для МЧ з низькою температурою та сильним електричним полем. Установлено, що як термо-, так і автоелектронна емісія викликають зменшення абсолютної величини плаваючого потенціалу $\varphi_{\Pi\lambda}$ МЧ. Проте, на відміну від термоелектронної емісії, автоелектронна емісія не призводить до зміни знаку потенціалу МЧ на протилежний.

У підрозділі 2.4 досліджено нагрівання та випаровування макрочастинки у плазмовій системі з електронним пучком.

Для аналізу динаміки температури МЧ $T_{MЧ}$ розв'язано систему рівнянь балансів енергії та струмів

$$Mc \frac{dT_{MЧ}}{dt} = P_e + P_i + P_{e,b} - P_n - P_{C-B} - P_{e-e} - P_{e,TE} - P_B, \quad (9)$$

$$I_e(\varphi) + I_i(\varphi) + I_b(\varphi) + I_{e-e}(\varphi) + I_{e,TE}(\varphi, T_{MЧ}) = 0. \quad (10)$$

Температура МЧ $T_{MЧ}$ залежить від квазістаціонарного потенціалу φ . В (9) потужності P_e , P_i та $P_{e,b}$ відносяться до нагрівання МЧ, відповідно, електронами плазми, іонами плазми та електронним пучком. P_{C-B} , $P_{e,TE}$, $P_{e,BE}$, P_B , P_n – це потужності, що пов’язані з охолодженням МЧ: P_{C-B} – внаслідок теплового випромінювання, $P_{e,TE}$ – внаслідок термо-автоелектронної (термоелектронної) емісії, P_{e-e} – внаслідок вторинної електронної емісії, P_B – внаслідок випаровування, P_n – внаслідок теплообміну з оточуючим газом. Потужності, що пов’язані з охолодженням, залежать від температури МЧ, за винятком потужності P_{e-e} , що залежить від енергії електронного пучка. В (10) $I_e(\varphi)$, $I_i(\varphi)$, $I_b(\varphi)$ – це струми електронів плазми, іонів плазми, та електронного пучка, відповідно, що надходять до поверхні МЧ. $I_{e-e}(\varphi)$ та $I_{e,TE}(\varphi, T_{MЧ})$ – це струми вторинної електронної емісії та термо-автоелектронної емісії (граничний випадок – термоелектронна емісія), відповідно, що виходять з поверхні МЧ.

Оцінено роль кожного чинника у рівнянні балансу енергії (9), що призводить до охолодження та нагрівання МЧ. Показано, що МЧ здебільшого нагрівається електронним пучком. Числове розв’язання системи рівнянь (9)-(10) проведено для МЧ з різних матеріалів: купруму, титану та молібдену. Досліджено можливість випаровування МЧ електронним пучком. Показано, що інтенсивність випаровування МЧ у плазмі з електронним пучком визначається розміром та теплофізичними властивостями речовини МЧ, параметрами плазми та енергією електронного пучка. Здобуто залежність температури МЧ від часу в плазмі за наявності електронного пучка з енергією електронів $\varepsilon_e = 5$ кеВ, а також залежність часу повного випаровування МЧ від енергії ε_e електронного пучка для МЧ з різних матеріалів за однакових концентрацій плазми та електронного пучка $n_0 = n_b = 10^{15} \text{ м}^{-3}$. Установлено, що час нагрівання МЧ з радіусами $a = 10 \text{ мкм}$ від температури плавлення $T_{пл}$ до температури кипіння T_k складає $10^{-3} \div 10^{-2} \text{ с}$, а МЧ з радіусами $a = 1 \text{ мкм}$ – складає 10^{-4} с .

У підрозділі 2.5 розглянуто можливість руйнування МЧ електронним пучком з енергією електронів $\varepsilon_e = 2 \div 5$ кеВ. Проведено аналіз стійкості сильнозарядженої МЧ з купруму, яка перебуває у рідкому стані.

Радіус МЧ, що підлягає руйнуванню електронним пучком, визначено з такої умови:

$$a < a_{кр} = 2.86 \frac{\pi \varepsilon_0 \varphi^2}{\sigma}, \quad (11)$$

де ε_0 – це діелектрична стала, σ – коефіцієнт поверхневого натягу, φ – потенціал МЧ.

Здобуто залежність критичного радіусу купрумної МЧ від енергії ε_e електронного пучка. Рисунок 2 показує, що для руйнування МЧ у плазмі з концентрацією $n_0 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ потрібні потужніші пучки, ніж у плазмі з концентрацією $n_0 = 10^{15} \text{ м}^{-3}$. Так, для того щоб зруйнувати МЧ з радіусом 1 мкм, яка міститься у плазмі з концентрацією $n_0 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, енергія електронного пучка має дорівнювати 3 кеВ, а з радіусом 20 мкм – 5 кеВ.

Показано, що позбавлення макрочастинки від надлишкового заряду відбувається шляхом релеевого розпаду її на частини або внаслідок термо-автоелектронної (автоелектронної) емісії. Здобуто характерні часи нагрівання та руйнування МЧ. Показано, що для великих МЧ час нагрівання є великим, а час руйнування, навпаки, малим.

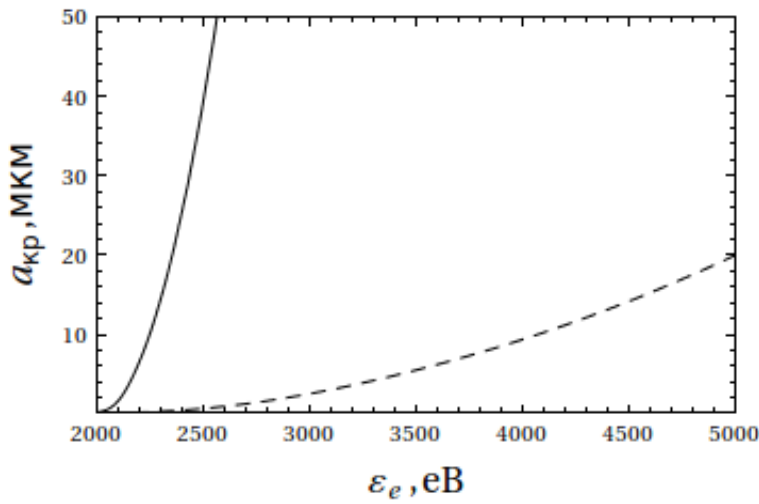


Рис. 2 Залежність критичного радіусу купрумної МЧ, яка міститься у плазмі

з концентрацією: (1) $n_0 = 10^{15} \text{ м}^{-3}$ (суцільна лінія), (2) $n_0 = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ (штрихова лінія), від енергії ε_e електронного пучка. Концентрація електронного пучка $n_b = 10^{15} \text{ м}^{-3}$

У підрозділі 2.6 досліджено можливість випаровування МЧ у пучково-плазмовому розряді з гарячими електронами, що мають температуру $10 \div 100 \text{ еВ}$. Аналіз проведено на підставі розв'язання системи самоузгоджених рівнянь балансу струмів та енергій:

$$I_e(\varphi_{Pl}) - I_i(\varphi_{Pl}) - I_{e-e}(\varphi_{Pl}) - I_{e,T}(\varphi_{Pl}) = 0. \quad (12)$$

$$P_e + P_i - P_{e,T} - P_B - P_{C-B} - P_{e-e} = 0. \quad (13)$$

В (12) I_e, I_i, I_{e-e} та $I_{e,T}$ – це струми електронів плазми, йонів плазми, вторинної електронної емісії та термоелектронної емісії, відповідно. В (13) P_e та P_i – це потужності, що пов'язані з електронами та йонами плазми; P_{e-e} , $P_{e,T}$, P_{C-B} та P_B – це потужності внаслідок вторинної електрон-електронної емісії, термоелектронної емісії, теплового випромінювання та випаровування. Усі потужності віднесені до одиниці площі МЧ.

Дослідження проведено для МЧ у плазмі з йонів $T_i = 1 \text{ еВ}$ та температурою електронів $T_e = 10 \div 100 \text{ еВ}$. Плазма утримується магнітним полем з напруженістю 100 ерстед. Концентрація плазми складає $10^{16} \div 10^{17} \text{ м}^{-3}$. Показано, що МЧ може бути

випареною при проходженні крізь плазму з гарячими електронами за температур МЧ, нижчих за температуру кипіння. Визначено швидкості МЧ, які можуть бути повністю або частково випарені у пучково-плазмовому розряді. Наприклад, МЧ з радіусом 1 мкм, яка рухається зі швидкістю 10 м/с, може бути повністю випарена у плазмі з температурою електронів 50 еВ. Оцінено можливість іонізації випареної речовини МЧ. Установлено, що 50÷60 % випареної речовини МЧ може бути йонізованою, до того ж ефективність іонізації зменшується зі зменшенням концентрації плазми.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах [3, 4, 7, 8, 15, 16] та доповідались на конференціях [20, 23].

У **третьому розділі** досліджено динаміку та фазові стани МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду залежно від плазмових параметрів, таких як концентрація плазми, зарядовий стан та енергія йонів. Запропоновано пояснення відсутності МЧ на осаджених поверхнях покриттів при потужнострумовому імпульсному дуговому режимі роботи планарної магнетронної розпилювальної системи.

У підрозділі 3.1 досліджено динаміку крапельної фази у плазмі вакуумно-дугового розряду, проаналізовано плазмові умови, за яких можливе нагрівання, охолодження та випаровування МЧ.

Аналіз проведено на підставі рівнянь енергетичного балансу

$$Mc \frac{dT_{MЧ}}{dt} = P_e + P_i - P_{C-B} - P_n, \quad T_{MЧ} < T_k, \quad (14)$$

$$H \frac{dM}{dt} = P_e + P_i - P_{C-B} - P_n, \quad T_{MЧ} = T_k, \quad (15)$$

де c – це питома теплоємність матеріалу МЧ, H – це питома теплота пароутворення, M – маса МЧ, $T_{MЧ}$ – температура МЧ, T_k – температура кипіння речовини. В (14), (15) P_{C-B} , P_n – це потужності, що пов'язані з охолодженням МЧ: P_{C-B} – внаслідок теплового випромінювання, P_n – внаслідок теплообміну з оточуючим газом.

Іони та електрони із плазми нагрівають МЧ. Потужність, що пов'язана з іонним пучком, дорівнює:

$$P_i = 0.6n_0 \sqrt{2k_B T_e / m_i} \varepsilon_i A, \quad (16)$$

де A – це площа абсорбції, $A = 4\pi s^2$, де $s = a + \lambda_D$; n_0 – концентрація плазми, a – початковий радіус МЧ, $\varepsilon_i = |e\varphi_{Pl}|$ – це енергія йона.

Потужність, що пов'язана з електронами плазми, дорівнює:

$$P_e = n_0 \sqrt{k_B T_e / 2\pi m_e} \exp(-e\varphi_{Pl} / k_B T_e) S, \quad (17)$$

де S – це площа поверхні МЧ, $S = \pi a^2$.

Плаваючий потенціал МЧ, розрахований у наближенні Бома, є таким:

$$\varphi_{Pl} = 0.6 \frac{k_B T_e}{e} \ln \left(\frac{2m_i}{\pi m_e} \right). \quad (18)$$

Здобуто критичні розміри МЧ з різних речовин. Залежно від розмірів МЧ поділені на групи: при початковому розмірі МЧ $D > D_{кр1}$ МЧ охолоджуються та досягають підкладки у твердому стані; при $D_{кр2} < D < D_{кр1}$ МЧ нагріваються до рівноважної температури; при $D < D_{кр2}$, МЧ досягають температури кипіння та можуть бути випареними. На Рис. 3 наведено критичні розміри купрумної МЧ.

Здобуто залежності температури титанових та купрумних МЧ різних розмірів від часу за параметрами плазми: концентрація плазми $n_0 = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, температура електронів $T_e = 10 \text{ еВ}$, температура йонів $T_i = 10 \text{ еВ}$. Також здобуто залежності температури титанових і купрумних МЧ з початковим радіусом 1 мкм від часу за різних концентрацій плазми: $n_0 = 0.3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $n_0 = 1.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $n_0 = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Ефективність нагрівання підвищується зі збільшенням концентрації плазми. Виявилося, що на протилежність купрумним МЧ, титанові МЧ через 0.01 с починають охолоджуватися. Це дає можливість припустити, що за концентрації плазми $n < 10^{15} \text{ см}^{-3}$ через деякий час макрочастинка охолоне до температури, нижчою за температуру плавлення ($T_{пл} = 1938^\circ \text{ К}$), та до підкладки титанові МЧ наблизяться у твердому стані. Здобуто залежність часу повного випаровування купрумної МЧ від концентрації плазми. Показано, що МЧ, радіус яких задовольняє умові $D < D_{кр2}$, можуть бути випареними на довжині прольоту 1 м у плазмі імпульсного вакуумно-дугового розряду.

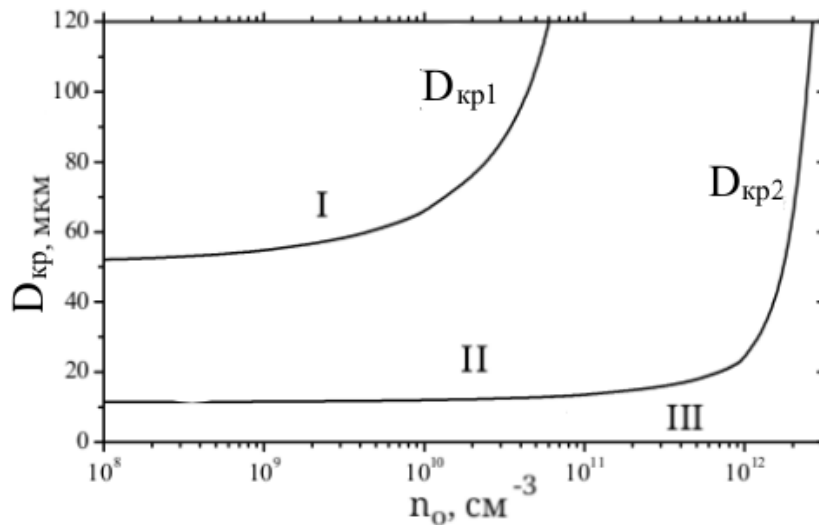


Рис.3 Залежність критичних розмірів ($D_{кр1}$, $D_{кр2}$) купрумної МЧ від концентрації плазми

У підрозділі 3.2 проаналізовано вплив зарядового стану та енергії йонів на потенціал та температуру МЧ. Зарядовий стан йонів відіграє суттєву роль, оскільки від нього залежить кінетична енергія йонів, яка визначає тип взаємодії йонів з оброблюваною поверхнею. Бомбардування МЧ йонним потоком викликає вторинну іон-електронну емісію з поверхні МЧ. До того ж багатозарядні йони, які мають достатньо високу енергію, можуть викликати розпорошення речовини МЧ.

Аналіз проведено на підставі розв'язання системи рівнянь балансу струмів та енергій з урахування вторинної іон-електронної та термо-автоелектронної емісії:

$$I_i(\varphi_{\Pi l}) + I_e(\varphi_{\Pi l}) + I_{i-e}(\varphi_{\Pi l}) + I_{e,TE}(\varphi_{\Pi l}) = 0, \quad (19)$$

$$P_e + P_i - P_{C-B} - P_{i-e} - P_{e,TE} - P_B = 0. \quad (20)$$

В (19) I_e, I_i, I_{i-e} та $I_{e,TE}$ – це струми електронів плазми, йонів плазми, вторинної іон-електронної емісії та термоелектронної емісії, відповідно. В (20) P_e та P_i – це потужності, що пов'язані з електронами та йонами плазми; P_{i-e} , $P_{e,TE}$, P_{C-B} та P_B – це потужності внаслідок вторинної йон-електронної емісії, термо-автоелектронної емісії, теплового випромінювання та випаровування. Струм йонів I_i на МЧ розраховано у межах повної теорії орбітального руху, яка враховує скінченність плазмового шару навколо МЧ. Таке наближення є коректним у випадку густої плазми з концентрацією $n_0 > 10^{12} \text{ см}^{-3}$ або у випадку МЧ з радіусом $a \leq \lambda_D$.

Сумарна потужність, яку передають іони з різними зарядовими станами k на МЧ, дорівнює:

$$P_i = \sum_k \frac{E_{ef}(k)}{ke} f_k I_{ik}, \quad (21)$$

де I_k – це струм, який несе k компонента; $f_k = n_{ik}/n_i$ – частка йонів кожного типу, n_i – загальна концентрація йонного пучка, яка складається з суми індивідуальних концентрацій n_{ik} .

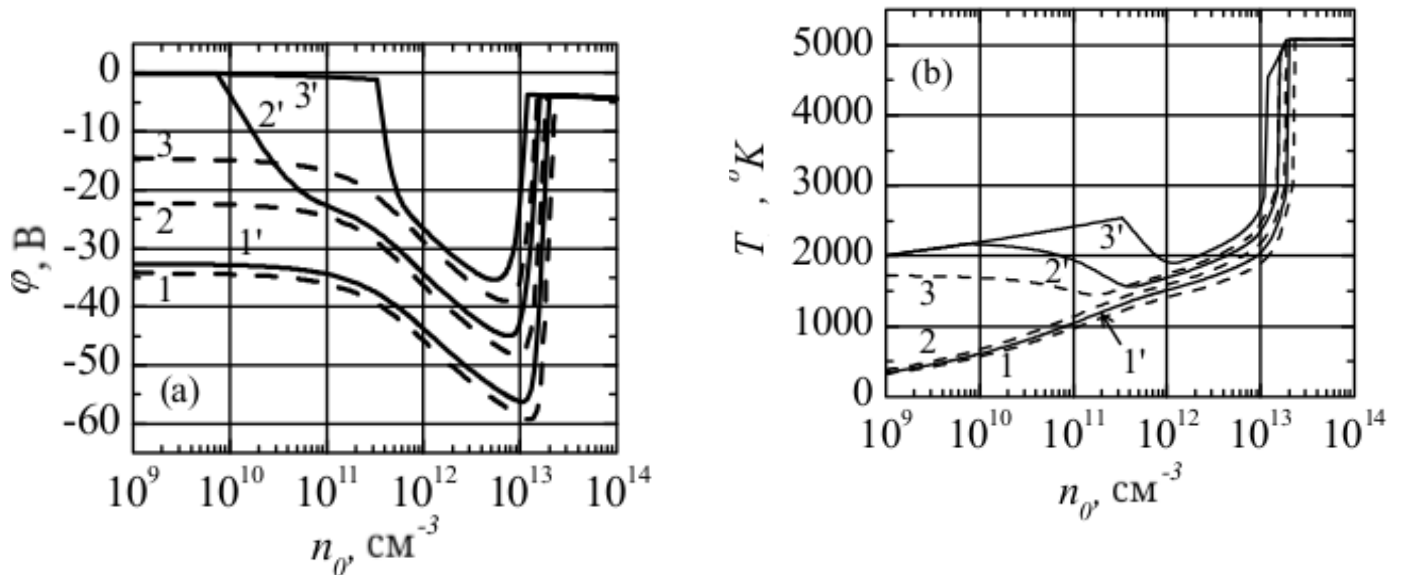


Рис. 4 Залежність (а) потенціалу φ та (б) відповідної температури T вольфрамової МЧ від концентрації плазми з різними зарядовими станами: 1, 1' – $Z=1$, 2' – $Z=2$, 3, 3' – $Z=3$. Штрихові лінії відповідають енергії йонного пучка 20 еВ, суцільні лінії відповідають енергії 35 еВ

Ефективна енергія, яку приносять багатозарядні йони до МЧ, має такий вигляд:

$$E_{\text{ef}}(k) \approx \varepsilon_{ik} + W_B + W_z + W_{0 \rightarrow k} - ke\Phi, \quad (22)$$

де W_B – це енергія випаровування одного атома (або енергія зв'язку), W_z – енергія збудження зв'язаних електронів, W_i – енергія йонізації, $W_{0 \rightarrow k} = \sum_{k'=1}^k W_{k'}$ – кумулятивна енергія йонізації йона, яка складається з суми всіх енергій йонізації. З оцінки ефективної енергії (22) для йонів вольфраму випливає, що внесок у нагрівання МЧ багатозарядними йонами є більшим, ніж однозарядними, унаслідок їхньої високої енергії йонізації, а також унаслідок k -кратного збільшення їхньої кінетичної енергії у шарі просторового заряду навколо МЧ.

Результати чисельного розв'язання системи рівнянь балансу струмів та енергій (19) та (20) для вольфрамової МЧ, що перебуває у вакуумній дузі з вольфрамовим катодом, наведено на Рис. 4.

У випадку плазми з концентрацією $n_0 > 10^{13} \text{ см}^{-3}$ відбувається інтенсивне нагрівання МЧ. Зокрема, така концентрація плазми є властивою імпульсному режиму роботи вакуумно-дугового розряду, для якого характерні значення концентрації плазми лежать у межах $n_0 = 10^{12} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Представлено динаміку радіусу МЧ у плазмі при її розпорошенні йонними пучками з енергіями іонів 2 кеВ та 4 кеВ та концентраціями $10^{18} \div 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Показано, що за енергій іонів $> 60 \text{ еВ}$ має місце саморозпорошення йонами МЧ з вольфраму. Установлено, що при плазмово-йонній обробці поверхонь протягом 2 хвилин можливе розпорошення малих МЧ ($< 1 \text{ мкм}$) пучком іонів з концентрацією $n_i = 10^{19} \text{ м}^{-3}$ у діапазоні енергій $2 \div 4 \text{ кеВ}$.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах [1, 2, 6, 9, 14] та доповідались на конференції [24].

У **четвертому розділі** досліджено вплив потенціалу зсуву підкладки на МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду. Розглянуто заряджання та динаміку МЧ у приповерхневому плазмовому шарі при докладанні до підкладки постійного та імпульсного негативних потенціалів зсуву. Дослідження проведено за умов, що відповідають різним технологічним процесам: вакуумно-дуговому осадженню тонких плівок та плазмовій імерсійній йонній імплантації.

У підрозділі 4.1 досліджено заряджання та динаміку МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду при осадженні покриттів. Для опису заряджання МЧ у плазмовому шарі побудовано внутрішньо самоузгоджену комбіновану теоретичну модель, складниками якої є стаціонарна модель плазмового шару та модель заряджання МЧ на основі теорії ООР.

У підрозділі 4.1.1 побудовано модель плазмового шару. Згідно із моделлю складниками плазми є електрони, багатозарядні йони та вторинні електрони, які емітують з підкладки внаслідок бомбардування багатозарядними йонами. За типових умов вакуумно-дугового осадження (потенціал зсуву підкладки менше 400 В) має місце лише потенціальна електронна емісія, оскільки кінетична енергія не бере участь

у викиванні електронів з поверхні при енергіях, нижчих за граничну енергію, що приблизно дорівнює 1 кеВ.

Розподіл потенціалу $\phi(x)$ у плазмовому шарі задовольняє рівнянню Пуассона:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{e}{\varepsilon_0} \left[\sum_{k=1}^N k n_{ik} - \sum_{k=2}^N n_{ek} - n_e \right] \quad (23)$$

з такими крайовими умовами:

$$\phi(0) = 0, d\phi/dx(0) = 0. \quad (24)$$

В (23) n_e – це концентрація плазмових електронів, n_{ik} – концентрація k -ої компоненти йонів; n_{ek} – концентрація вторинних електронів, що вивільняються з підкладки.

Концентрації заряджених частинок на межі плазма-шар задовольняють умові квазінейтральності:

$$n_e(0) \cong \sum_{k=1}^N k n_{ik} + \sum_{k=2}^N n_{ek}. \quad (25)$$

У підрозділі 4.1.2 побудовано модель заряджання МЧ на основі теорії ООР. Розглянуто ізолювану МЧ, що міститься у зустрічних потоках іонів і вторинних електронів, які викликані потенціальною електронною емісією з підкладки. Заряджання МЧ у плазмовому шарі досліджено з урахуванням як емісійних процесів з поверхні МЧ, так і вторинної іон-електронної емісії з підкладки, що виникає внаслідок бомбардування підкладки багатозарядними металевими йонами.

Плаваючий потенціал МЧ визначено із такого балансу струмів:

$$I_i(\phi_{MЧ}) - I_e(\phi_{MЧ}) - I_{BE}(\phi_{MЧ}) + I_{i-e}(\phi_{MЧ}) + I_{e-e}(\phi_{MЧ}) = 0, \quad (26)$$

де $\phi_{MЧ}$ – це потенціал МЧ відносно плазми, I_i – струм багатозарядних іонів, I_e – струм електронів плазми, I_{BE} – струм вторинних електронів з підкладки, I_{i-e} – струм вторинних електронів, що емітують з поверхні МЧ внаслідок іон-електронної емісії, I_{e-e} – струм вторинних електронів, що емітують з поверхні МЧ унаслідок електрон-електронної емісії.

Припущено, що зовнішнє електричне поле не руйнує форму шару просторового заряду навколо МЧ з радіусом a . У рамках ємнісної моделі МЧ зв'язок між зарядом МЧ та потенціалом МЧ є таким:

$$Q = C(\phi_{нов} - \phi) = C\phi_{MЧ}, \quad (27)$$

де ємність МЧ дорівнює $C = 4\pi\varepsilon_0 a(1 + a/\lambda_d)$.

У підрозділі 4.1.3 розглянуто динаміку МЧ у плазмовому шарі. Здобуто такий критерій відбиття МЧ від підкладки:

$$V_0 a \leq (6\varepsilon_0 \phi_{MЧ}(x) \phi(x) / \rho \sin^2 \theta)^{1/2}, \quad (28)$$

де ρ – це густина матеріалу МЧ, V_0 – початкова швидкість МЧ, θ – кут відносно площини катоду, ε_0 – діелектрична стала. Критерій відбиття (28) означає, що потенціальна енергія електричної взаємодії МЧ з плазмовим шаром має бути вищою за початкову кінетичну енергію МЧ.

У підрозділі 4.1.4 проведено чисельне моделювання заряджання та динаміки МЧ у плазмовому шарі за типових умов ВДО тонких плівок у вакуумній дузі з титановим катодом у діапазоні потенціалів зсуву підкладки $-(20\div 300)$ В.

Якісно описано фізичний механізм відбиття МЧ від підкладки. Розраховано заряд МЧ залежно від положення МЧ усередині плазмового шару. Здобуто критичні радіуси та швидкості МЧ (Рис.5). Підраховано число МЧ, які мають радіус, вищий за критичний, тобто які спроможні досягнути підкладки. Маленькі МЧ з розмірами <1.1 мкм не спроможні досягти поверхні підкладки, на яку подано потенціал зсуву -300 В. Вміст таких МЧ сягає 70% від загальної кількості емітованих МЧ. Також підраховано відносну площу, яку займають осажені МЧ на покриттях. Порівняно результати моделювання з результатами експерименту.

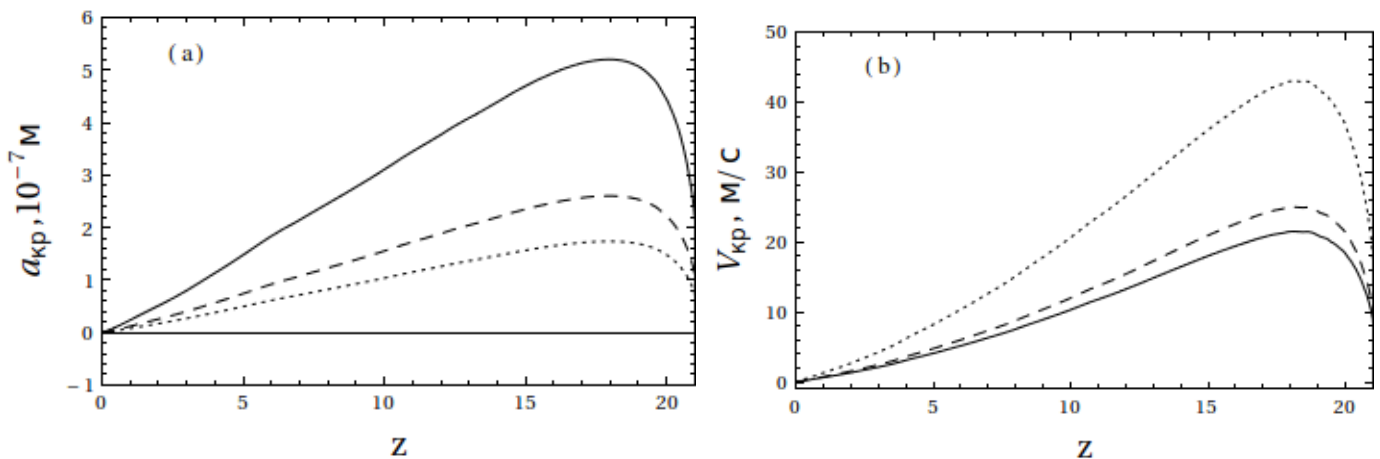


Рис. 5 Залежності (а) критичного радіусу МЧ, яка рухається перпендикулярно до підкладки зі швидкістю 10 м/с (суцільна лінія), 20 м/с (штрихова лінія), 30 м/с (точкова лінія); та (б) критичної швидкості МЧ з радіусом 0.25 мкм, яка вилетіла під кутом до площини катоду: $\theta = 90^\circ$ (суцільна лінія), $\theta = 60^\circ$ (штрихова лінія), $\theta = 30^\circ$ (точкова лінія), від безрозмірної відстані $z = x/\lambda_d$ від межі плазма-шар для потенціалу зсуву підкладки -300 В

У підрозділі 4.2 досліджено заряджання та динаміку МЧ у вакуумно-дуговому розряді при плазмовій іммерсійній імплантації іонів (ПІМІІ). Для опису заряджання МЧ у плазмовому шарі побудовано внутрішньо самоузгоджену комбіновану теоретичну модель, складниками якої є модель плазмового шару та модель заряджання МЧ на основі теорії ООР.

У випадку низькоенергетичної ПІМІІ з імпульсами довгої тривалості припущено, що плазмовий шар є стаціонарним. Згідно із моделлю багатозарядні йони, прискорені електричним полем плазмового шару до високих енергій, викликають вторинну іон-електронну емісію з підкладки. За типових умов ПІМІІ (потенціал зсуву підкладки >1 кВ) найбільший внесок у загальний коефіцієнт емісії здійснює кінетична електронна емісія. На протилежність потенціальній електронній емісії коефіцієнт цієї

емісії залежить від кінетичної енергії налітаючих на підкладку йонів. Це означає, що коефіцієнт кінетичної електронної емісії визначається потенціалом зсуву підкладки. Застосування негативного потенціалу зсуву до підкладки впливає на виривання вторинних електронів з підкладки йонами та на їх прискорення у плазмовому шарі.

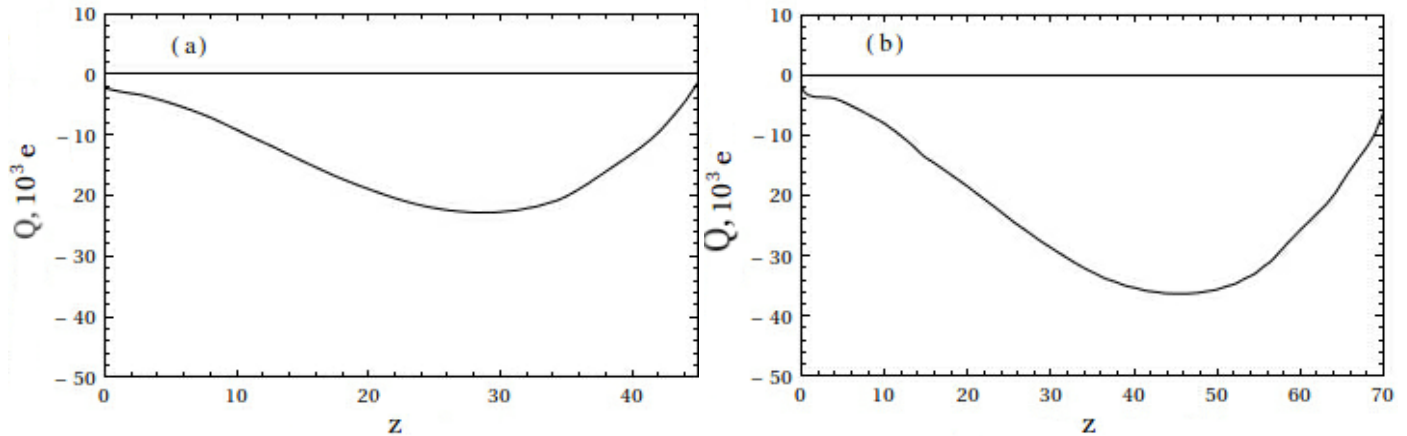


Рис. 6 Залежність заряду МЧ з радіусом 0.25 мкм від нормованої відстані $z = x/\lambda_d$ від межі плазма-шар для різних значень потенціалу зсуву підкладки: (а) -1 кВ; (б) -2 кВ

Зарядження МЧ у плазмовому шарі досліджено з урахуванням як ефективної електронної емісії з поверхні МЧ, яка складається із іон-електронної та електрон-електронної емісій, так і КЕЕ з підкладки, що виникає внаслідок бомбардування підкладки багатозарядними металевими йонами. Чисельне моделювання проведено у межах запропонованої теорії на прикладі вакуумної дуги з титановим катодом за типових умов ПМІМІ. Вплив КЕЕ на зарядження та динаміку МЧ у плазмовому шарі досліджено для потенціалу зсуву підкладки $-(1 \div 2)$ кВ. Розраховано заряд МЧ залежно від положення МЧ усередині шару (Рис. 6). Отримано, що МЧ заряджається негативно внаслідок того, що густина струму вторинних електронів з підкладки є більшою за густину струмів іонів.

У підрозділі 4.3 досліджено зарядження та динаміку МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду при імпульсному потенціалі зсуву підкладки.

Запропоновано модель зарядження та динаміки МЧ поблизу підкладки, до якої застосовано імпульсний потенціал зсуву. Чисельне моделювання проведено у межах запропонованої теорії для випадку ПМІМІ з короткими негативними імпульсами $1 \div 9$ мкс з амплітудою 2 кВ, 5 кВ, 10 кВ. Досліджено динаміку зарядження МЧ як упродовж імпульсу, так і в інтервалі між імпульсами. Показано, що заряд та поведінка МЧ залежать від параметрів імпульсного потенціалу, таких як тривалість імпульсу, період і амплітуда потенціалу.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах [11, 13, 19, 21] та доповідались на конференціях [25, 27].

У п'ятому розділі дисертації проаналізовано вплив реакційного газу на динаміку та фазові стани макрочастинки у плазмі вакуумно-дугового розряду. Запропоновано пояснення зменшення числа МЧ у вакуумно-дуговому розряді у присутності реакційного газу нітрогену, який впливає на заряджання та динаміку МЧ в плазмі, а також на зменшення її температури. Теоретичні моделі заряджання та динаміки МЧ розроблені для двох ділянок вакуумно-дугового розряду: у розрядному проміжку та у шарі просторового заряду. Чисельне моделювання заряджання, динаміки та фазових станів МЧ у рамках запропонованої теорії проведено на прикладі МЧ у плазмі вакуумної дуги з титановим катодом з робочим газом нітрогеном у діапазоні тисків $0.001 \div 1.3$ Па.

У підрозділі 5.1 проаналізовано перебіг плазмово-хімічних реакцій у вакуумно-дуговому розряді за наявності газу нітрогену. Також побудовано плазмово-хімічну модель, що визначає основні процеси, які є відповідальними за генерацію та втрату металевих і газових іонів у вакуумно-дуговому розряді у присутності нітрогену. Для спрощення плазмово-хімічної моделі зроблено наступні припущення:

- 1) металеві іони утворюються внаслідок їх зарядового обміну з молекулами N_2 :



- 2) водночас газові іони утворюються як унаслідок перезаряджання, так і внаслідок електронної іонізації.

Згідно з цими припущеннями, концентрації металевих та газових іонів, n_k і n_i , отримано з таких рівнянь балансу:

$$\frac{dn_k}{dt} = nn_{k+1} \langle \sigma_{k+1} u_{k+1} \rangle - nn_k \langle \sigma_k u_k \rangle, \quad (30)$$

$$\frac{dn_i}{dt} = k_i n_e n + \sum_1^3 nn_{k+1} \langle \sigma_{k+1} u_{k+1} \rangle - \sum_1^3 nn_k \langle \sigma_k u_k \rangle, \quad (31)$$

де n_e – це концентрація електронів, n – концентрація нейтралів; u_k – швидкість металевих іонів, k_i – коефіцієнт електронної іонізації газу, σ_k – переріз зіткнення, що змінює зарядовий стан металевого іону зі стану $k = Z$ на стан $k = Z-1$; $n \langle \sigma_k u_k \rangle$ означає усереднену частоту зіткнень.

Переріз зіткнення має квадратичну залежність від початкового зарядового стану Z

$$\sigma_k = \pi a_0^2 Z^2 (I_H / I)^2, \quad (32)$$

де $a_0 = 0.529 \times 10^{-8}$ см – радіус Бора для першої орбіти атома гідрогену; $I_H = 13.6$ еВ – енергія йонізації атома гідрогену з основного стану; I – енергія йонізації атома мішені.

У підрозділі 5.2 побудовано внутрішньо самоузгоджену комбіновану теоретичну модель, складниками якої є плазмово-хімічна модель, гідродинамічна модель розрядного проміжку та теорія заряджання ООР.

Плазмові параметри, такі як склад плазми, густина струму йонів та швидкості йонів, отримано з розв'язання рівнянь балансу йонів та моменту руху йонів:

$$\frac{d}{dx}(n_j u_j) = S_j, \quad (33)$$

$$u_j \frac{d}{dx}(n_j u_j) + n_j u_j \frac{du_j}{dx} - \frac{q_j}{m_j} n_j E + n_j u_j v_j = 0, \quad (34)$$

де E – це напруженість електричного поля; $q_j = Ze$ – заряд іону j -го типу; $v_j = n \sigma_j u_j$ – частота зіткнень, σ_j – поперечний переріз зіткнень між іоном j -го типу та нейтральним атомом чи молекулою, зумовлений переважно непружними зіткненнями зарядового обміну; n – концентрація нейтралів. Символом S_j позначено загальне число йонів, що утворюються та зникають унаслідок реакцій зарядового обміну.

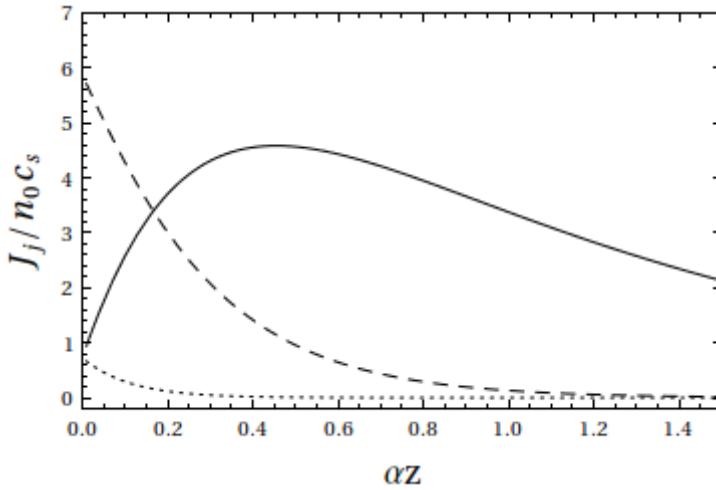


Рис. 7 Залежність потоку іонів від частоти зіткнень αz : Ti^+ (суцільна лінія), Ti^{2+} (штрихова лінія), Ti^{3+} (точкова лінія)

На Рис. 7 наведено залежності нормованих потоків іонів у розрядному проміжку від αz , що чисельно дорівнює числу зіткнень для кожного типу іонів, які долають шлях z ($z \equiv x/\lambda_d$, $\alpha_j \equiv \lambda_d/\lambda_j$, λ_j – довжина вільного пробігу, λ_d – довжина Дебая). Ступінь зіткнень α_j означає число зіткнень у Дебаєвій сфері. Отримано, що загалом, потоки титанових іонів зменшуються з відстанню, а при $\alpha z > 1$ потоки багатозарядних іонів майже повністю зникають. Проведено аналіз найважливіших сил, що впливають на рух МЧ у розрядному проміжку: електростатичної сили, сили тертя з боку нейтралів та сили йонного захоплення.

Електростатична сила \vec{F}_E , яка зумовлена взаємодією зарядженої МЧ електричним полем, дорівнює

$$\vec{F}_E = Q\vec{E}. \quad (35)$$

Заряд Q МЧ з радіусом $a \ll \lambda_d$ у межах ємнісної моделі дорівнює

$$Q = 4\pi\epsilon_0 a \phi_{MЧ}, \quad (36)$$

де $\phi_{MЧ}$ – це потенціал МЧ. Потенціал $\phi_{MЧ}$ та відповідний заряд Q МЧ розраховано у межах теорії ООР.

Сила йонного захоплення, яка у випадку йонів з надзвуковими швидкостями повністю визначається поглинанням іонів, дорівнює

$$\vec{F}_i = \sum_j \pi a^2 n_j m_j v_j \vec{u}_j \left(1 - \frac{2q_j \phi_{MЧ}}{m_j v_j^2} \right). \quad (37)$$

Сила тертя на МЧ з боку нейтралів задається співвідношенням Ейнштейна:

$$\vec{F}_n = -\frac{8}{3} \sqrt{2\pi} a^2 n m_n v_{T,n} \vec{V}, \quad (38)$$

де \vec{V} – це швидкість МЧ, n – густина нейтральних атомів, $v_{T,n} = \sqrt{8k_B T_n / \pi m_n}$ – теплова швидкість нейтральних атомів, T_n – температура нейтрального газу, m_n – маса нейтральних атомів. У формулі (38) зроблено припущення, що відносна швидкість між МЧ і нейтралами $|\vec{V} - \vec{v}_n|$ є дуже малою порівняно з тепловою швидкістю нейтралів $v_{T,n}$.

Показано, що сила йонного захоплення зменшується з тиском у той час, як сила тертя з боку нейтралів збільшується. Таким чином, сила йонного захоплення прискорює МЧ до підкладки та навпаки, сила тертя з боку нейтралів її сповільнює. Електрична сила є малою в розрядному проміжку. Продемонстровано, що МЧ можна утримати у плазмі вакуумно-дугового розряду за наявності реакційного газу низького тиску ($p \leq 1$ Па), завдяки балансу сили тертя з боку нейтралів, сили йонного захоплення та електростатичної сили.

У підрозділі 5.3 побудовано внутрішньо самоузгоджену комбіновану теоретичну модель, складниками якої є плазово-хімічна модель, гідродинамічна модель плазового шару та теорія заряджання ООР. Проте, у гідродинамічній моделі плазового шару на відміну від моделі розрядного проміжку не враховано генерацію йонів. Таке припущення зроблено у випадку тонкого плазового шару за низьких тисків ($p \leq 1$ Па), виходячи з оцінки ширини плазового шару s порівняно з середньою довжиною вільного пробігу іонів λ_j , згідно якої $s \ll \lambda_j$.

Основними рівняннями гідродинамічної моделі плазового шару є рівняння моменту руху та рівняння Пуассона:

$$m_j u_j \frac{du_j}{dx} = -q_j \frac{d\phi}{dx} - m_j n_0 \sigma_j u_j^2, \quad (39)$$

$$\epsilon_0 \frac{d^2 \phi}{dx^2} = -\sum_j \frac{J_{j0}}{u_j} + e n_0 \exp\left(\frac{e\phi}{k_B T_e}\right), \quad (40)$$

де $J_{j0} = q_j n_{j0} u_{j0}$ – це густина струму йонів на межі плазма-шар; n_j , u_j та m_j – це концентрація, швидкість та маса йонів j -го типу, відповідно; n_0 – концентрація

всередині плазмового об'єму. Сила тертя між іонами та нейтралами $F_j = m_j n_0 \sigma_j u_j^2$ є прямо пропорційною до квадрату швидкості іонів при сталому перерізі зіткнень σ_j .

До системи рівнянь додаються крайові умови:

$$\phi(0) = 0, \left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{x=0} = 0, u_j(0) = u_{j0}. \quad (41)$$

Система рівнянь (39)-(40) записана з урахуванням неперервності потоків іонів та розподілу електронів за Больцманом.

Зарядження МЧ досліджено у межах теорії ООР, оскільки за низьких тисків (<1.3 Па) електронна довжина Дебая λ_D є набагато меншою за довжину вільного пробігу йонів λ_j . Проте, головна різниця між зарядженням МЧ у розрядному проміжку та у плазмовому шарі полягає у тому, що у плазмовому шарі електричне поле плазмового шару суттєво впливає на зарядження МЧ. Плаваючий потенціал МЧ $\phi_{MЧ}$ знаходять з рівняння балансу струмів

$$I_e(\phi_{MЧ}) = \sum_j I_j(\phi_{MЧ}). \quad (42)$$

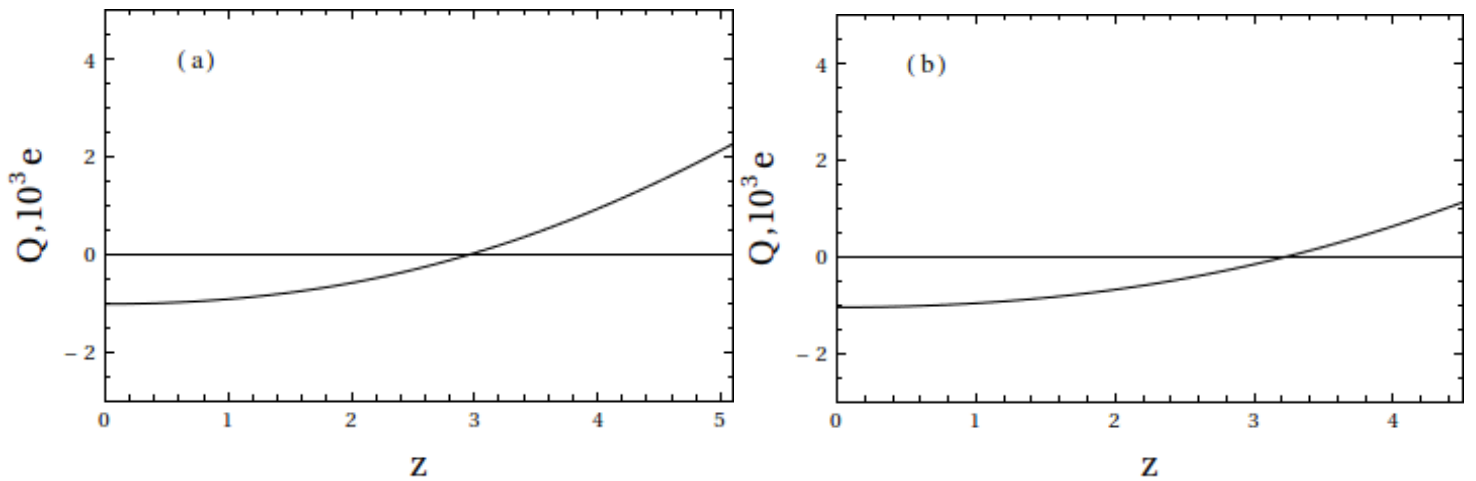


Рис. 8 Залежність заряду МЧ з радіусом 0.25 мкм від нормованої координати за різних значень тиску нітрогену: (а) $p = 0.0001$ Па; (б) $p = 0.1$ Па

Зв'язок між зарядом і потенціалом МЧ у межах ємнісної моделі є таким:

$$Q = C(\phi_{нов} - \phi) = C\phi_{MЧ}. \quad (43)$$

На Рис. 8 наведено розрахований заряд МЧ у плазмовому шарі з урахуванням залежності зарядового складу йонів, потоків та енергій іонів від тиску газу. З графіків на Рис. 8 випливає, що ймовірність електростатичного відбиття зростає з тиском нітрогену внаслідок збільшення ділянки плазмового шару, де заряд МЧ є негативним. Електростатичне відбиття впливає лише на число осаджених МЧ, але не на їхні розміри. Розміри МЧ визначаються об'ємом катодної плями, який суттєво

зменшується при підвищенні температури плавлення на поверхні катоду внаслідок утворення сполук. Проведено порівняння результатів моделювання з результатами експерименту.

У підрозділі 5.4 досліджено динаміку температури та відповідний фазовий стан МЧ в плазмі вакуумно-дугового розряду за наявності газу нітрогену. Для чого було розв'язано рівняння енергетичного балансу МЧ, на поверхні якої утворилася сполука нітриду титану. Показано, що присутність газу нітрогену у камері вакуумно-дугового розряду призводить до охолодження МЧ, внаслідок чого МЧ надходять до підкладки у твердому стані (Рис. 9).

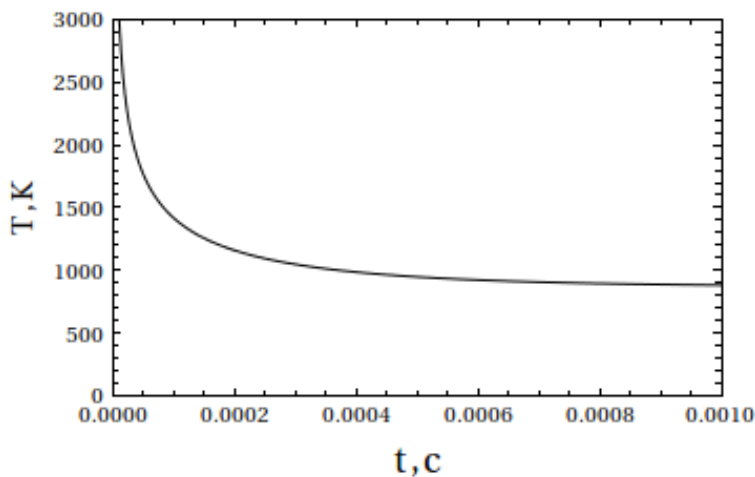


Рис. 9 Залежність температури титанової МЧ з радіусом 0.1 мкм від часу у плазмі з концентрацією $n = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ за тиску газу нітрогену 1 Па

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах [17, 18, 22] та доповідались на конференції [26].

У шостому розділі досліджено заряджання та рух МЧ у вакуумно-дугових джерелах плазми з криволінійним магнітним фільтром.

У підрозділі 6.1 досліджено рух плазмових потоків у криволінійному магнітному фільтрі. Побудовано теоретичну модель транспортування плазмових потоків у криволінійному магнітному фільтрі, яка враховує вторинні електрони, що викликані бомбардуванням пучком іонів підкладки.

У підрозділі 6.2 досліджено заряджання МЧ у вакуумно-дугових джерелах плазми з криволінійним магнітним фільтром з урахуванням вторинної іон-електронної емісії з підкладки.

У підрозділі 6.3 досліджено рух МЧ у вакуумно-дугових джерелах плазми з криволінійним магнітним фільтром з урахуванням вторинної іон-електронної емісії з підкладки. Розглянуто вплив радіального електричного поля на рух МЧ у магнітному фільтрі. Визначено умови, за яких можливе проходження МЧ крізь магнітний фільтр.

Зарядження МЧ досліджено у межах теорії ООР. Оцінки показали, що застосування теорії ООР до опису МЧ, що міститься у плазмі з магнітним полем з індукцією $B=100\text{Гс}$, є коректним, оскільки задовольняється умова

$$B < B_{кр}. \quad (44)$$

Рух МЧ у каналі плазмоводу визначено із законів збереження енергії та кутового моменту

$$E_0 = \frac{MV_0^2}{2} + U(R_1) = \frac{MV_\theta^2}{2} + \frac{MV_R^2}{2} + U(R), \quad (45)$$

$$MV_{\theta 0} R_1 = MV_\theta R, \quad (46)$$

де V_θ та V_R – це поперіодальна та радіальна складові швидкості (рух МЧ в азимутальному напрямку не розглядають, $v_\xi = 0$), R_1 – положення МЧ на вході до плазмоводу відносно осі O_l , та R – поточне положення МЧ у плазмоводі; $U(R) = Q\phi(R)$ – потенціальна енергія МЧ.

Пройходження МЧ крізь магнітний фільтр визначено з такої умови:

$$E_0 < (\phi(R) - \phi(R_1))Q. \quad (47)$$

Установлено, що транспортування МЧ крізь магнітний фільтр залежить від заряду МЧ, радіального електричного поля та радіусу вигину фільтра R . Здобуті результати пояснюють наявність МЧ на виході з криволінійного плазмоводу із застосуванням позитивного потенціалу зсуву, що спостерігали в експериментах.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах [5, 10, 12].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі теоретично досліджено фізичні механізми динаміки та фазових станів макрочастинок (МЧ) у пучково-плазмових системах. Проведені дослідження дають можливість зробити такі основні висновки.

1. Показано, що процес взаємодії МЧ з плазмою за наявності електронного пучка є комплексним. Бомбардування МЧ електронним пучком безпосередньо викликає вторинну електрон-електронну емісію та додаткові емісійні процеси, такі як термоелектронна та автоелектронна емісії, які виникають через підвищення температури та електричного поля МЧ, відповідно. Встановлено, що як термо-, так і автоелектронна емісія викликають зменшення абсолютної величини плаваючого потенціалу $\phi_{пл}$ МЧ. Проте, на відміну від термоелектронної емісії, автоелектронна емісія не призводить до зміни знаку потенціалу МЧ на протилежний. Це пояснюється тим, що ці емісії відбуваються за різних енергій електронного пучка.

2. Показано, що інжекція електронного пучка з енергією електронів $\varepsilon_e = 2\div 10\text{ кеВ}$ у вакуумно-дугові технологічні системи нанесення покриттів дає можливість випаровувати та руйнувати МЧ під час її руху до підкладки. Встановлено, що процеси випаровування та електростатичного руйнування МЧ електронним пучком

визначаються розміром та типом речовини МЧ, параметрами плазми та енергією електронного пучка. Показано, що для руйнування МЧ у плазмі з більшою концентрацією потрібні потужніші пучки, ніж у плазмі з меншою концентрацією.

3. Показано, що бомбардування МЧ з радіусами $0.1 \div 10$ мкм електронним пучком з енергією понад 2 кеВ призводить до надвисокого заряджання (до величини заряду $10^5 e$). Показано, що позбавлення МЧ від надлишкового заряду відбувається шляхом релеєвого розпаду її на частини або внаслідок термо-автоелектронної (автоелектронної) емісії.

4. Установлено, що МЧ у пучково-плазмовому розряді залежно від розмірів і швидкості можуть бути повністю або частково випарені при їхньому проходженні крізь плазму з гарячими електронами. Час випаровування зменшується зі зменшенням температури плазмових електронів.

5. Встановлено, що у плазмі вакуумно-дугового розряду за певних плазмових умов (концентрації плазми, температури електронів, температури йонів) для кожної речовини існують критичні розміри, що визначають динаміку температури. Здобуто критичні розміри МЧ з різних речовин. Залежно від розмірів МЧ поділені на групи: при початковому розмірі МЧ $D > D_{кр1}$ МЧ охолоджуються та досягають підкладки у твердому стані; при $D_{кр2} < D < D_{кр1}$ МЧ нагріваються до рівноважної температури; при $D < D_{кр2}$ МЧ досягають температури кипіння та можуть бути випареними. Показано принципову можливість нагрівання та подальшого випаровування МЧ у плазмі імпульсного вакуумного-дугового розряду за високої концентрації плазми понад 10^{12} см^{-3} .

6. Установлено, що багатозарядні йони суттєво впливають на динаміку та фазові стани МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду. Показано, що підвищення середнього зарядового стану викликає збільшення коефіцієнта вторинної іон-електронної емісії, та як наслідок, зменшення абсолютної величини потенціалу МЧ. Установлено, що внесок до нагрівання МЧ від багатозарядних іонів є більшим, ніж від однозарядних.

7. Продемонстровано принципову можливість електростатичного відбиття МЧ від підкладки у вакуумно-дуговому розряді шляхом збільшення негативного потенціалу зсуву підкладки. Показано, що збільшення негативного зсуву потенціалу підкладки призводить до збільшення абсолютної величини негативного заряду МЧ у плазмовому шарі та тим самим до збільшення електростатичного відбиття МЧ від підкладки.

8. Показано, що домінуючу роль у заряджанні та динаміці МЧ у плазмовому шарі відіграє вторинна іон-електронна емісія з підкладки: за умов, що відповідають вакуумно-дуговому осадженню тонких плівок, – це потенціальна електронна емісія, а за умов, що відповідають плазмовій імерсійній іонній імплантації, – це кінетична електронна емісія.

9. Доведено, що реакційний газ впливає на число МЧ у вакуумно-дуговому розряді не лише завдяки процесам на поверхні катоду, а також завдяки плазмовим параметрам, які є відповідальними за заряджання та динаміку МЧ. Для того, щоб дослідити динаміку МЧ у плазмовому потоці, запропоновано внутрішньо

самоузгоджену комбіновану теоретичну модель, складниками якої є плазмово-хімічна модель, одновимірна гідродинамічна модель і теорія заряджання обмеженого орбітального руху.

10. Показано, що докладання до підкладки імпульсного потенціалу зсуву, збільшення негативного потенціалу зсуву підкладки, додавання реакційного газу до робочої камери вакуумно-дугового розряду, застосування імпульсних режимів роботи вакуумно-дугового розряду, інжекція електронного пучка до вакуумно-дугових технологічних систем є ефективними альтернативними засобами зменшення забруднень МЧ при вакуумно-дуговому осадженні тонких плівок і покриттів, а також плазмовій імерсійній іонній імплантації без застосування магнітних фільтрів. Установлено, що проходження МЧ крізь магнітний фільтр залежить від заряду МЧ, радіального електричного поля та геометричних розмірів фільтру.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці у наукових фахових виданнях України:

1. Бизюков А. А., **Ромашченко Е. В.**, Серeda К. Н., Чибисов А. Д., Кашаба А. Е. Динамика капельной фазы в плазме дугового разряда низкого давления // Вісник Харківського університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля». 2004. Вип. 3 (25), № 642. С. 42–46.

Особистий внесок: Дисертантка здобула критичні розміри МЧ з різних речовин, що визначають динаміку температури, залежно від плазмових параметрів; побудувала діаграму груп макрочастинок за критичними розмірами.

2. Бизюков А. А., Серeda К. Н., Кашаба А. Е., **Ромашченко Е. В.**, Чибисов А. Д., Поневчинский В. В., Слепцов В. В. Испарение макрочастиц в плазме сильнооточного импульсного дугового разряда низкого давления // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения». 2006. № 5. С. 136–141.

Особистий внесок: Дисертантка брала участь у дослідженні режимів роботи планарної магнетронної розпилювальної системи; запропонувала модель, яка пояснює відсутність МЧ на осаджених поверхнях покриттів у потужнострумовому імпульсному дуговому режимі роботи планарної магнетронної розпилювальної системи.

3. Bizyukov A. A., **Romashchenko E. V.**, Sereda K. N., Chibisov A. D., Nazarov A. V. Emission characteristics and potential of macroparticle in beam-plasma discharge // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Plasma Physics”. 2008. № 6 (58). P. 162–164.

Особистий внесок: Дисертантка побудувала теоретичну модель заряджання МЧ у плазмі пучково-плазмових систем з урахуванням автоелектронної емісії, а також з урахуванням обмеження емісійного струму власним просторовим зарядом.

4. Бизюков А. А., **Ромашченко Е. В.**, Середя К. Н, Чибисов А. Д. Нагрев и испарение металлических макрочастиц в пучково-плазменных системах // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения». 2010. № 4 (68). С. 189–192.

Особистий внесок: Дисертантка побудувала теоретичну модель енергетичного обміну між МЧ та плазмою вакуумної дуги, до якої додають електронний пучок; здобула залежність температури МЧ від часу в плазмі вакуумно-дугового розряду за наявності електронного пучка.

5. Бизюков А. А., Чибисов А. Д., Ромашченко Е. В., Коваленко В. В. Эффективность магнитной сепарации макрочастиц в вакуумно-дуговых системах нанесения покрытий // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Фізика». 2015. № 38. С. 28–32.

Особистий внесок: Дисертантка розрахувала потенціал МЧ у вакуумно-дуговій системі залежно від енергії вторинних електронів.

Наукові праці у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

6. Bizyukov A. A., Kashaba A. Ye., **Romashchenko E. V.**, Sereda K. N., Tarasov I. K., Abolmasov S. N. Features of high-current pulsed regimes in magnetron sputtering systems // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Plasma Physics”. 2005. № 2. P. 167–169. (Web of Science).

Особистий внесок: Дисертантка брала участь у дослідженні режимів роботи планарної магнетронної розпилювальної системи; виконала розрахунки динаміки розподілу температури у приповерхневому шарі матеріалу мішені магнетронної розпилювальної системи при підведенні тепла до поверхні за умови низького тиску робочого газу.

7. Bizyukov A. A., Chibisov A. D, **Romashchenko E. V.** Effect of the parameters of a gas-discharge plasma on the equilibrium temperature and floating potential of a macroparticle // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Plasma Physics”. 2012. № 6 (82). P. 175–177. (Scopus, Web of Science).

Особистий внесок: Дисертантка удосконалила теоретичну модель енергетичного обміну між МЧ та плазмою вакуумної дуги, до якої додають електронний пучок, урахувавши обмеження емісійного струму власним просторовим зарядом.

8. Biziukov A. A., **Romashchenko E. V.**, Sereda K. N, Abolmasov S. N. Particle charging in beam-plasma systems // Problems of Atomic Science and Technology, Series “Plasma Physics”. 2013. № 1 (83). P. 183–185. (Scopus, Web of Science).

Особистий внесок: Дисертантка побудувала теоретичну модель зарядового обміну МЧ з плазмою та електронним пучком на основі дискретної теорії та класичної теорії обмеженого орбітального руху; здобула аналітичний вираз для функції розподілу МЧ за зарядами.

9. Biziukov A. A., Chibisov A. D., Sereda K. N., **Romashchenko E. V.**, Dimitrova V. Charging processes and phase state of macroparticles in low-pressure arc discharge // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Plasma Electronics and New Methods of Acceleration”. 2013. № 4 (86). P. 176–178. (Scopus, Web of Science).
Особистий внесок: Дисертантка розрахувала потенціал МЧ у плазмі вакуумної дуги з урахуванням іон-електронної емісії та термоелектронної емісії; визначила вплив зарядового стану йонів на потенціал і температуру МЧ.
10. Biziukov A. A., Sereda K. N., Chibisov A. D., **Romashchenko E. V.**, Kovalenko V. V. Capture and transport of macroparticles in curved plasma dust at low magnetic field in the presence of an electron beam // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Plasma physics”. 2014. № 6 (94). P. 164–167. (Scopus, Web of Science).
Особистий внесок: Дисертантка здобула критичний радіус МЧ, яка може бути захопленою в криволінійному плазмоводі.
11. Biziukov A. A., Girka I. O., Romashchenko E. V., Chibisov A. D. Charging of macroparticles in a high-voltage vacuum arc sheath // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Plasma physics”. 2015. № 1 (95). P. 246–248. (Scopus, Web of Science).
Особистий внесок: Дисертантка розрахувала потенціал МЧ у плазмовому шарі вакуумно-дугового розряду як функцію локального положення МЧ у плазмовому шарі з урахуванням потенціальної електронної емісії з підкладки, що викликана бомбардуванням багатозарядними йонами.
12. Biziukov A. A., Chibisov D. V., Chibisov A. D., Romashchenko E. V., Kovalenko V. V. Dynamics of macroparticles in a magnetic filter for a vacuum arc plasma sources // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Plasma Electronics and New Methods of Acceleration”. 2015. № 4 (98). P. 298–301. (Scopus, Web of Science).
Особистий внесок: Дисертантка удосконалила модель динаміки МЧ у магнітному фільтрі вакуумно-дугових джерел плазми; проаналізувала умови, за яких можливе транспортування МЧ крізь фільтр.
13. **Romashchenko E. V.**, Biziukov A. A., Girka I. O. Macroparticle reflection from a biased substrate in plasma ion implantation systems // East European Journal of Physics. 2020. № 1. P. 60–65. (Scopus, Web of Science).
Особистий внесок: Дисертантка розрахувала заряд МЧ у плазмовому шарі при плазмовій імерсійній імплантації іонів з урахуванням кінетичної електронної емісії з підкладки, яка викликана бомбардуванням багатозарядними йонами.

Наукові праці у наукових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

14. Biziukov A. A., Girka O. I., Kashaba A. Ye., Romashchenko E. V., Sereda K. N., Chibisov A. D. Phase states of macroparticles under interection of keV ion beam with dusty plasma // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Plasma Physics”. 2010. № 6 (70). P. 147–149. (Scopus, Web of Science).

Особистий внесок: Дисертантка розв'язала рівняння балансів енергії та маси МЧ в іонно-плазмовій системі.

15. Biziukov A. A., Chibisov A. D., **Romashchenko E. V.**, Kolyada Yu. E. Vaporization of metallic macroparticles in high temperature technology plasma // Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma physics". 2016. № 6 (106). P. 268–271. (Scopus, Web of Science).

Особистий внесок: Дисертантка визначила швидкості макрочастинок, які можуть бути повністю або частково випарені при їхньому проходженні крізь плазму з гарячими електронами.

16. Biziukov A. A., Chibisov A. D., **Romashchenko E. V.**, Kolyada Yu. E. Decay of liquid metallic macroparticles in plasma-beam systems due to Rayleigh instability // Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Physics". 2017. № 1 (107). P. 163–166. (Scopus, Web of Science).

Особистий внесок: Дисертантка побудувала теоретичну модель електростатичного руйнування макрочастинок електронним пучком; провела аналіз умов, за яких відбувається руйнування МЧ електронним пучком.

17. **Romashchenko E. V.**, Biziukov A. A., Girka I. O. Charging of a macroparticle in cathodic arc sheath // Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Electronics and New Methods of Acceleration". 2018. № 4 (116). P. 176–180. (Scopus, Web of Science).

Особистий внесок: Дисертантка розрахувала заряд МЧ у плазмовому шарі вакуумної дуги з урахуванням залежності зарядового складу іонів, потоків та енергій іонів від тиску реакційного газу.

18. **Romashchenko E. V.**, Biziukov A. A., Girka I. O. Dynamics of macroparticle in a weakly collisional plasma // Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Physics". 2019. № 1 (119). P. 112–115. (Scopus, Web of Science).

Особистий внесок: Дисертантка дослідила вплив зіткнень іонів з нейтралами на динаміку МЧ; здобула залежності сили тертя з боку нейтралів та сили тертя з боку йонів від частоти зіткнень.

19. **Romashchenko E. V.**, Biziukov A. A., Girka I. O. Effect of pulsed substrate biasing on macroparticle in vacuum arc // Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Electronics and New Methods of Acceleration". 2019. № 4 (122). P. 120–123. (Scopus, Web of Science).

Особистий внесок: Дисертантка побудувала теоретичну модель взаємодії МЧ з плазмою поблизу підкладки, до якої застосовано імпульсний потенціал зсуву.

Наукові праці у зарубіжних наукових спеціалізованих виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз:

20. Biziukov A. A., **Romashchenko E. V.**, Sereda K. N., Chibisov A. D. Electric potential of a macroparticle in beam-plasma system // Plasma Physics Reports. 2009. Vol. 35, Iss. 6. P. 449–501. (Scopus, Web of Science).

Особистий внесок: Дисертантка поширила теорію обмеженого орбітального руху на випадок заряджання МЧ з урахуванням електрон-електронної емісії; здобула критичні розміри МЧ, які підлягають руйнуванню електронним пучком.

21. Bizyukov A. A., Girka I. O., **Romashchenko E. V.** Transport of a macroparticle in vacuum arc sheath // IEEE Transactions on Plasma Science. 2016. Vol. 44, Iss. 7. P. 1050–1056. (Scopus, Web of Science).

Особистий внесок: Дисертантка побудувала теоретичну модель, що дає можливість дослідити динаміку МЧ у плазмовому шарі вакуумно-дугового розряду; якісно та кількісно описала фізичний механізм електростатичного відбиття МЧ від підкладки та здобула критерій відбиття МЧ від підкладки.

22. **Romashchenko E. V.**, Bizyukov A. A., Girka I. O. Effect of background gas pressure on macroparticles in cathodic arc plasma deposition // IEEE Transactions on Plasma Science. 2019. Vol. 47, Iss. 3. P. 1494–1499. (Scopus, Web of Science).

Особистий внесок: Дисертантка побудувала теоретичну модель, яка дає можливість дослідити динаміку МЧ у плазмовому потоці, що формується у розрядному проміжку вакуумно-дугового розряду в присутності реакційного газу.

Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях) за темою дисертації:

23. Bizyukov A. A., **Romashchenko E. V.**, Sereda K. N, Abolmasov S. N. Particle charging in beam-plasma systems // Nano- and micro-sized structures in plasmas : International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and the Adjoint Workshop, 17–22 Sept. 2012. : abstr. Kharkiv, 2012. P. 153.

Особистий внесок: Дисертантка здобула аналітичний вираз для функції розподілу МЧ за зарядами.

24. Girka I. O., Bizyukov A. A., **Romashchenko E. V.**, Krivonosov S. D. Effect of multiply charged ions on macroparticles dynamics // Nano- and micro-sized structures in plasmas: International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop, 15–18 Sept. 2014. : abstr. Kharkiv, 2014. P. 168.

Особистий внесок: Дисертантка визначила вплив зарядового стану йонів на потенціал і температуру МЧ.

25. **Romashchenko E. V.**, Bizyukov A. A., Girka I. O. Macroparticle in beam-plasma systems // International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion, 12–15 Sept. 2016. : abstr. Kharkiv, 2016. P. 116.

Особистий внесок: Дисертантка визначила критичні швидкості МЧ, які здатні електростатично відбитися від підкладки.

26. **Romashchenko E. V.**, Bizyukov A. A., Girka I. O. Dynamics of macroparticle in a weakly collisional plasma // International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion, 10–13 Sept. 2018. : abstr. Kharkiv, 2018. P. 107.

Особистий внесок: Дисертантка дослідила вплив зіткнень іонів з нейтралами на динаміку МЧ; здобула залежності сили тертя з боку нейтралів та сили тертя від частоти зіткнень.

27. **Romashchenko E.**, Girka I., Bizyukov A. Macroparticles in ion beam processing // Deutsche Physikalische Gesellschaft-Fruhjahrstagung, 13–17 Marz 2017. : abstr. Bremen, 2017. P. 106.

Особистий внесок: Дисертантка розрахувала заряд МЧ у плазмовому шарі при плазмовій імерсійній іонній імплантації з урахуванням кінетичної електронної емісії з підкладки, яка викликана бомбардуванням багатозарядними йонами.

АНОТАЦІЯ

Ромашченко О. В. Динаміка та фазові стани макрочастинок в пучково-плазмових системах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України. – Харків, 2021.

Дисертаційну роботу присвячено теоретичному дослідженню та числовому моделюванню взаємодії макрочастинок (МЧ) з низькотемпературною плазмою низького тиску, в якій присутні пучки електронів чи іонів. Розглянуто процеси заряджання МЧ у плазмі з електронним (іонним) пучком, процеси енергетичного обміну між МЧ та плазмою з пучком електронів (іонів), що визначають динаміку та фазові стани МЧ у пучково-плазмових системах.

Досліджено динаміку та фазові стани МЧ у плазмі вакуумно-дугового розряду за умов, що відповідають різним технологічним процесам: вакуумно-дуговому осадженню тонких плівок та плазмовій імерсійній іонній імплантації.

У дисертації розкрито питання про методи очищення плазми від МЧ. Особливу увагу приділено альтернативним засобам зменшення забруднень МЧ покриттів без застосування магнітних фільтрів.

Ключові слова: низькотемпературна плазма, макрочастинка, електронний пучок, іонний пучок, вакуумно-дуговий розряд, вторинна електронна емісія, потенціальна електронна емісія, кінетична електронна емісія, магнітний фільтр.

АННОТАЦИЯ

Ромашченко Е. В. Динамика и фазовые состояния макрочастиц в пучково-плазменных системах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. – Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина Министерства образования и науки Украины. – Харьков, 2021.

Диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию и численному моделированию взаимодействия макрочастиц (МЧ) с низкотемпературной плазмой

низкого давления, в которой присутствуют пучки электронов или ионов. Исследованы процессы зарядки МЧ в плазме с электронным (ионным) пучком, процессы энергетического обмена между МЧ и плазмой с пучком электронов (ионов), которые определяют динамику и фазовые состояния МЧ в пучково-плазменных системах.

Исследованы динамика и фазовые состояния МЧ в плазме вакуумно-дугового разряда при условиях, соответствующих различным технологическим процессам: вакуумно-дуговому осаждению тонких пленок и плазменной иммерсионной ионной имплантации.

В диссертации рассмотрен вопрос о методах очистки плазмы от МЧ. Особое внимание уделяется альтернативным способам уменьшения загрязнений покрытий МЧ без применения магнитных фильтров.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, макрочастица, электронный пучок, ионный пучок, вакуумно-дуговой разряд, вторичная электронная эмиссия, потенциальная электронная эмиссия, кинетическая электронная эмиссия, магнитный фильтр.

ABSTRACT

Romashchenko O. V. Dynamics and phase states of macroparticles in the beam-plasma systems. – Manuscript.

Thesis for a Doctoral Degree in Physics and Mathematics: Speciality 01.04.08 – Plasma Physics. – V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kharkiv. 2021.

The thesis is devoted to the theoretical study and numerical modeling of the interaction of macroparticles (MPs) with the low-temperature plasma of the low pressure in the presence of the electron or ion beams. The physical mechanisms of the MP dynamics and phase states in the beam-plasma systems are shown to be complex ones. The processes of the MP charging in the plasma with electron (ion) beam, the processes of the energy exchange between the MP and the plasma with electron (ion) beam, that influence the dynamics and phase states of the MP in the beam-plasma systems, are considered. The effect of different electron emission processes on MP charging in the plasma with electron (ion) beam is studied in detail. In particular, the effect of the secondary electron emission, which is directly induced by electron (ion) beam bombardment, on MP is considered. Besides, the consequences of the MP bombardment by the electron (ion) beam due to the increasing of temperature and absolute value of negative potential of the MP are examined, namely the thermionic and field electron emissions. The theoretical model of the MP charging in the beam-plasma systems is modified to account the possible electron emission processes from the MP surface, such as secondary electron-electron emission, the thermionic electron emission, the field electron emission and thermal-field electron emission. The role of each electron emission is determined.

The physical mechanisms of the MP charging in the plasma systems in the presence of low-energy electron beam with energy below 10 keV and the current density below a few kA/cm² are considered. The charging of MP in the plasma with electron beam is investigated in the framework of the classical orbit motion limited (OML) approximation and on the basis

of the discrete charging model considering the MP as a floating electrostatic probe. The possibilities of the electrostatic disruption and evaporation of MP by the electron beam are studied.

The dynamics and phase states of the MP in the plasma of the vacuum arc discharge are investigated under conditions, which are relevant to different plasma processing such as vacuum arc deposition of the thin film, plasma immersion ion implantation (PIII), and reactive vacuum arc deposition.

The effects of ion charge state and ion energy on the potential and temperature of the MP are investigated. The absence of MPs on the substrate surface in the case of high-current pulsed arc regime of the planar magnetron sputtering system is explained. The critical sizes of the MP which determine the temperature dynamics for given plasma parameters are obtained. The possibility of the sputtering of MP by the ion beam is studied.

The effect of substrate biasing on the charging and dynamics of MP in the plasma sheath near the substrate is investigated. The reduction of the MPs on the substrate surface is explained for two cases: when the applied bias to the substrate is constant, and when it is pulsed. To describe the MP charging in the sheath a self-consistent combined theoretical model is developed. This model consists of plasma sheath model and charging model of MP based on OML theory. In the case of constant bias, the sheath model is stationary, and, in the case of pulsed bias, it is time dependent. In the case of PIII with long pulse duration, the sheath is described as a stationary one.

The effect of reactive gas nitrogen on MP dynamics and phase states in the plasma of the vacuum arc discharge is investigated. The reduction of MPs in the cathodic vacuum arc is explained from the viewpoint of the MP dynamics. It is proved that presence of the reactive gas leads to the MP reduction due to the processes on the cathode surface as well as the plasma parameters, which are responsible for the charging and dynamics of the MP.

The thesis focuses on the methods of the plasma purification from MPs. The charging and motion of the MP in the vacuum-arc plasma sources with curvilinear magnetic filter are studied with taking into account the secondary ion-electron emission from the substrate. The plasma conditions, under which the MP can pass through the magnetic filter, are analyzed. The main attention is paid to the alternative methods of reducing the MP contaminations in coatings without applying any magnetic filters. The obtained results can be applied to the control of the MPs in the plasma processing such as vacuum arc deposition of thin films and plasma immersion ion implantation.

Key words: low-temperature plasma, macroparticle, electron beam, ion beam, vacuum arc discharge, secondary electron emission, potential electron emission, kinetic electron emission, magnetic filter.